

計測ボーリング技術を活用した ボーリングマシンの掘進制御に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON DRILLING MACHINE OPERATION USING INSTRUMENTED DRILLING TECHNOLOGY

眞本 悠一*・谷 和夫**・金子 進***

Yuichi SHINMOTO, Kazuo TANI and Susumu KANEKO

Though drilling is most fundamental and important in geotechnical investigation, it still depends on experienced foreman's expertise. Recently instrumented drilling is recognized as essential for the future sophisticated drilling technology. However, foreman's drilling operation has not been studied with instrumented drilling technology yet. In this experimental study of instrumented drilling technology, analysis of ROP and apparent axial pressure of drilling machine is made and a control model for drilling machine operation is proposed.

Key Words: Instrumented drilling, Rotary drilling, Rate of penetration, Apparent axial pressure, Control model

1. はじめに

ボーリングは、あらゆる地質・地盤調査の中で最重要技術であるにも拘らず、未だにフォアマン（機長）の経験やノウハウなどに依存している。また近年、熟練フォアマンの高齢化と後継者不足の問題が顕在化し、前近代的な徒弟制度による技術継承も困難になっている。これらの問題を根本的に解決するためには、ボーリング技術を高度に体系化し、作業の省力化と標準化を強力に推し進める必要がある¹⁾。具体的には、まず地盤の掘削現象を解明し、その上で地下深部での掘削状況を正確に把握しながら最適な掘削方法を選択するシステムを構築しなくてはならない。また近年、職人の固有技術（テクニク）を機械化・自動化する試みが様々な技術分野に見られるが、ボーリング技術においてもその必要性が高まっている。石油などの資源掘削や材料の切削加工の分野において、ビットやカッターの磨耗率や掘削効率などに関する研究も行われているが²⁾、建設分野の地盤調査とは対象とする地盤の種類や深度、削孔の目的などが異なるので、これらの知見がそのまま適用できるとは限らない。

高度に発達した最近の計測・通信技術を応用した計測ボーリング技術の発展に伴い、掘削状況を定量的に表現する代表的な物理量（軸力、トルク、掘進速度、循環水の送水量と送水圧、回転数などの掘削変数）を計測することが可能になり、様々な方面でその利用が期待されている^{1,3)}。本論文で言う計測ボーリングは、英語で表現すると Instrumented Drilling で、文字通りには計測しながら削孔することを意味する。内容的には MWD (Measurement While Drilling) と類似しているが、“孔を掘る”行為 (Drilling) に重点が置かれていることが異なる。

計測ボーリング技術の目的は、①サウンディングとしての利用、②ボーリングマシンの自動制御、③試料や作業などの品質評価⁴⁾が挙げられる¹⁾。特に②は、道路状況を判断しながら目的地まで移動する自動運転に近いコンセプトで、地盤の特性や削孔の状況を検知しながら適切なアルゴリズムに基づいてボーリングマシンを自動的に制御する先進的な技術である。一方、フォアマンの高度な判断に基づく適切な制御は、掘削の効率化、試料の品質確保、掘進中のトラブルの回避などにつながる重要な技術である。しかし、フォアマンがボーリングマシンを制御するテ

* 正会員 工学修士 シュルンベルジェ株式会社 オイルフィールドサービス
** Ph.D 横浜国立大学大学院工学研究院
*** 正会員 工学士 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術開発部

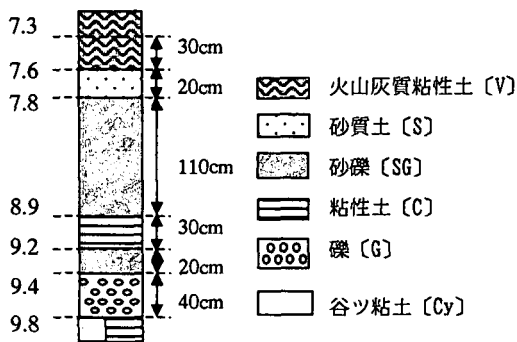


図-1 地盤の柱状図（深度の単位はm）

表-1 ドリリング・ツールの仕様

ツール	仕様
コアバレル	二重管式
ロッド	長さ 3m、直径 90mm
ビット	インプリグネーティッド・ダイヤモンド・ビット (外径 198mm, 内径 150mm)
循環ポンプ	最大流量 178 リットル/min
循環水	塩化カルシウム溶液

クニックを検討し、自動制御技術を開発しようとする研究は見当たらない。この原因は、削孔現象そのものが、地盤

の条件、使用するボーリングマシンやビットなど様々な要因に左右され非常に複雑な過程であることと、フォアマンの判断や制御に対する定量的な評価が困難なためである。

そこで、本研究では計測ボーリングの現場実験を行い、特にフォアマンが直接制御しているコントローラーの計測に着目し、経験豊かなフォアマンの判断や制御のプロセスを評価することを試みた。また、その判断や制御を踏まえた掘進制御のモデルを提案する。

2. 現場実験の概要

(1) 地盤の状況と実験装置

計測ボーリングの実験は、東京都東大和市内で実施した凍結サンプリングのロータリー掘削中に行った^{1,4)}。孔井数は 20 孔 (C0～C20) で、凍結サンプリングの対象深度は 7.3m～9.8m である。フォアマンは経歴 38 年のベテランで、凍結サンプリングのノウハウを熟知している。

① 地盤の概要

図-1 に地盤の柱状図を示す。物理試験の結果に基づく工学的分類とコア観察から、火山灰質粘性土〔V〕、砂質土〔S〕、砂礫〔SG〕、粘性土〔C〕、礫〔G〕、谷ツ粘土〔Cy〕に 6 分類した。凍結された地盤の温度は約 -25℃と計測された。この凍結温度に対する各地盤の一軸圧縮強さ q_u は、〔V〕は 5～7MPa、〔S〕は 4～5MPa、〔SG〕は 8～13MPa、〔C〕および〔Cy〕は 4～12MPa、〔G〕は 10MPa と推測され⁵⁾、強度的には軟岩に相当する。

② ボーリングマシンとドリリング・ツール

ボーリングマシンは油圧フィード式（最大給圧 5MPa、最大掘削深度 500m）のロータリー削孔機で、給圧によってロッドに作用する軸力とスピンドルの回転数を制御することができる。

表-1 に掘削に使用したドリリング・ツール類の仕様を示す。軟岩相当の凍結地盤であるので、インプリグネーティッド・ダイヤモンド・ビットでオールコア（呼び径 150mm）掘削した。循環水は、凍結地盤の融解を防ぎ、かつ循環水自身の凍結を防止するため、塩化カルシウム溶液（凝固点 -13℃）を約 -11℃に冷却して用いた。

(2) 計測ボーリングの概要

① 計測システムの概要

図-2 に計測システムを示す。計測器を取り付けて電氣的に計測した項目は、軸力 Q 、掘進速度 V 、循環水の送水圧 P 、速度調整ハンドルの回転量 VC 、上部シリンダに作用する軸荷重 Q_s で、データロガーを介してモニタリングできる。データの計測間隔は 100msec とした。その他に、循環水の送水量 F 、スピンドルの回転速度 R 、電動モーターの負荷電流 I_m 、元圧調整ハンドルの操作 SPC を適宜記録した。本研究で特徴的なことは、通常の掘削変数だけでなく、 VC や SPC のような制御項目も計測した点である。

② 掘削変数の計測

- 上部シリンダに作用する軸荷重 Q_s : 上部シリンダに供給される油圧 (元圧) を計測し、ピストンの断面積を掛けて、作用する軸荷重 Q_s を算出する。
- 軸力 Q : 上部と下部のシリンダ内の圧力を計測する。ピストンの断面積と計測された圧力差の積として、ロッドに作用する軸力 Q を算出する。ビットが孔底に着座する直前の値をゼロとし、ビットの断面積に作用する送水圧の影響は補正した⁴⁾。
- 掘進速度 V : スピンドルの移動量を変位計 (巻き取り式エンコーダ) で計測する。PC 内で測定された経過時間を利用して掘進速度 V を算出する。
- 循環水の送水圧 P : 循環ポンプの吐出口 (地上高さ 60cm) における圧力を計測する。水頭差を考慮して孔底 (深度 Z) における送水圧 P を算出する。
- 循環水の送水量 F : 循環ポンプの周波数に対して設定されるポンプ吐出口からの排出量を、送水量 F とする。
- 回転速度 R : 回転スピンドルのギアに対して設定される。
- 電動モーターの負荷電流 I_m : 電動モーターに接続した消費電力計の電流値 I_m を計測する。スピンドルの回転に必要なトルクを代表する。

③ 制御項目に関する計測

- 速度調整ハンドルの回転量 VC : 速度調整ハンドルを操作する回転量を回転計 (巻き取り式エンコーダ) で計測する。掘進停止の状態の値をゼロとする。
- 元圧調整ハンドルの操作 SPC : 元圧調整ハンドルの操作の位置 (0/1/2) を記録する。

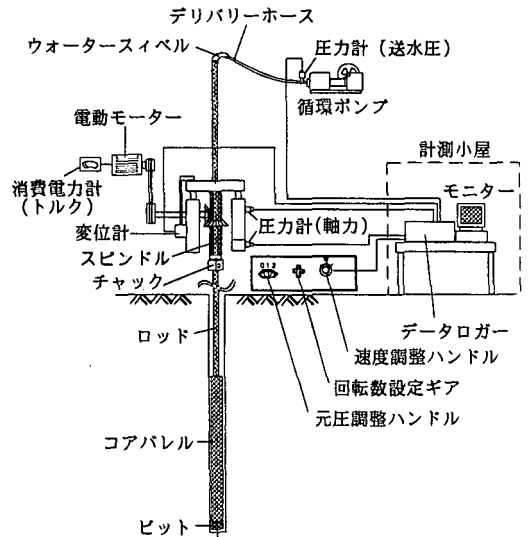


図-2 計測システムの概要

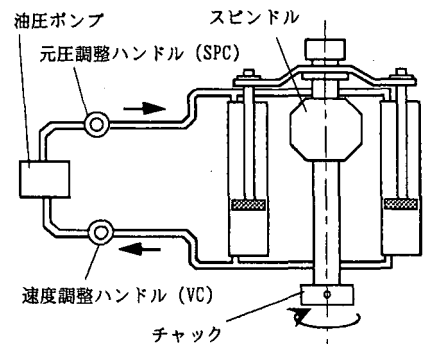


図-3 油圧制御システムの概要

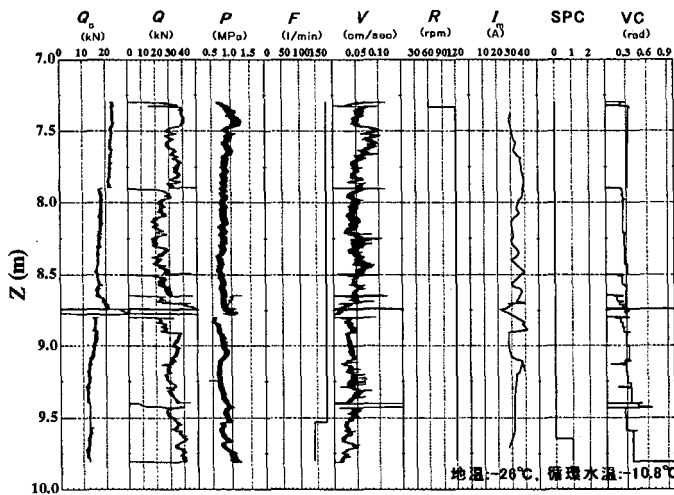


図-4 計測結果の一例 (C8 孔)

(3) ボーリングマシンの制御方法

図-3 にボーリングマシンの油圧制御システムを示す。油圧ポンプから供給される油圧を、元圧調整ハンドル SPC によって上部シリンダ内の圧力 (元圧) を制御する。この元圧調整ハンドルは開いた状態 (SPC=0/1) に固定され、通常は操作することは少ない。一方、速度調整ハンドル VC は、下部シリンダから排出される油量を制御することにより、掘進速度 V を変化させることができる⁶⁾。掘進を停止する場合には、この速度調整ハンドルを完全に

閉める（VC=0）と共に、元圧調整ハンドルを閉じる（SPC=2）。

3. 実験結果の概要⁸⁾

図-4にC8孔で計測された掘削深度Zに対する掘削変数（上部シリンダに作用する軸荷重 Q_s 、軸力 Q 、循環水の送水圧 P 、循環水の送水量 F 、掘進速度 V 、スピンドルの回転速度 R 、電動モーターの負荷電流 I_m ）および制御項目（速度調整ハンドルの回転量VC、元圧調整ハンドルの操作SPC）を示す。

VC=0の時は、 $Q_s=0$ および $V=0$ である。また掘進の初期状態（ $Z=7.3\text{m}$ ）では、SPC=0に対して Q_s は約20kNに設定されている。元圧調整ハンドルSPCの操作は掘進中にほとんどなく、異常事態の場合を除いて、速度調整ハンドルVCによって微妙な調整的な制御が行われていることが分かる。

各掘削変数の値の範囲は、循環水の送水圧 P は約0.5～1.2MPa、循環水の送水量 F は140～178リットル/minの範囲、スピンドルの回転速度 R は60～120rpmで、 I_m は20～40Aである。ただし、このC8孔では、コアリフターの楔化に伴うコア詰まりが深度 $Z=8.6\sim 8.8\text{m}$ で発生している⁷⁾。当該区間では、このトラブルを回避する作業としてVCが頻繁に制御されている。さらに、このトラブルの発生時にはSPCも制御しているが、その開閉が慌ただしかったために記録はされていない。ただし、 Q_s の値の変動にはSPCの制御が反映されている。

4. 掘削制御条件に関する検討の方法

(1) 検討の方法

図-5に検討のフローを示す。フォアマンが制御せずにマシン任せでも掘削が定常的かつ順調に行われている状態を一定制御過程、順調に掘削を継続するために掘削状況を判断しつつ速度調整ハンドルVCを操作する状態を調整制御過程と分類した。なお、トラブルに見舞われた区間は、例外的な制御過程であるので除外した。

① 見かけの軸応力 σ_{ap} の定義

ビットの種類（ノンコア／オールコア）や寸法によって掘進に必要な軸力が異なるので、軸力の制御を検討するために、計測された軸力 Q をビットの断面積 A_{bit} で割った見かけの軸応力 σ_{ap} （ $=Q/A_{bit}$ ）を定義した。ビットの断面積 A_{bit} は、ビットの投影断面積または掘削断面積である。この見かけの軸応力 σ_{ap} は、マクロに見たビットの切削面に作用する平均的な軸方向応力を表わし、ビットの種類や寸法の影響を除外して軸力の影響に関する検討を行うことができる。しかし、ダイヤモンド・ビットのチップに実際作用している局所的な応力は、はるかに大きい値であることに留意しなければならない。

② 一定制御過程の検討

計測データにおいて、制御を全く行っていない（SPCおよびVCが一定の）部分を抽出する。定常的な挙動を対象とするため、異常データを除去し、深度1cm毎の平均値を計算した。その後、掘削効率を定量的に表す代表値として掘進速度 V に注目して、見かけの軸応力 σ_{ap} との関係を検討する³⁾。

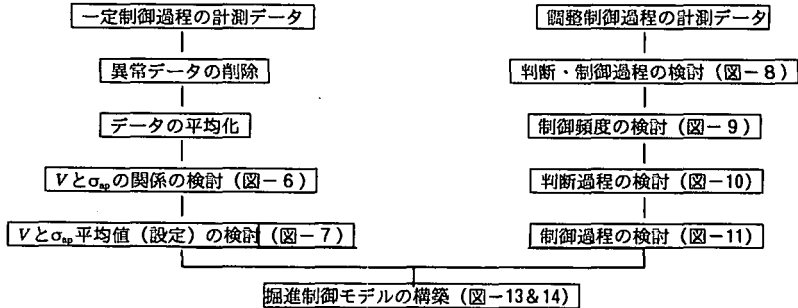
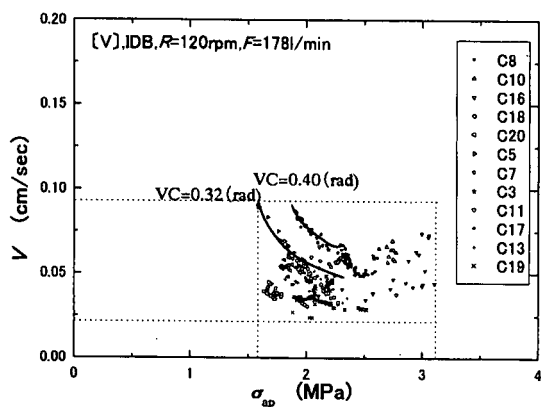
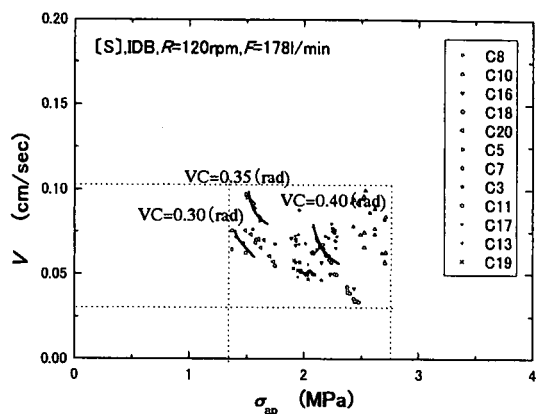


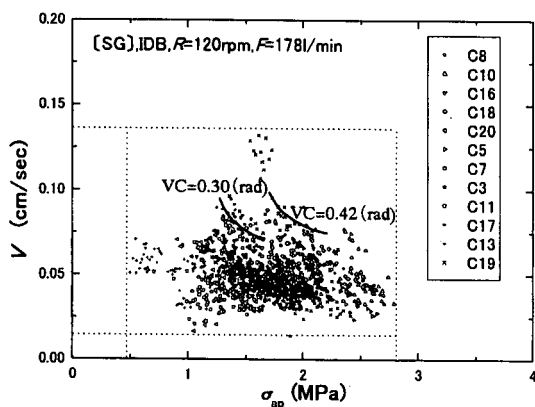
図-5 検討のフロー



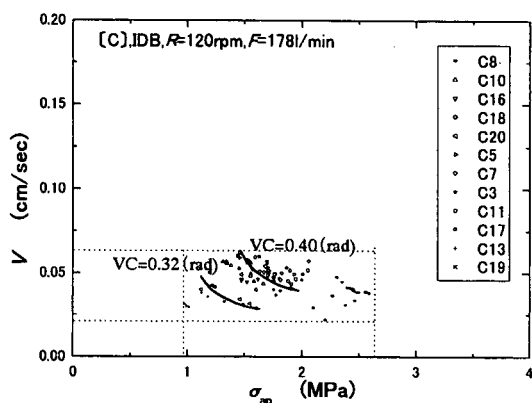
(a) 火山灰質粘性土 [V]



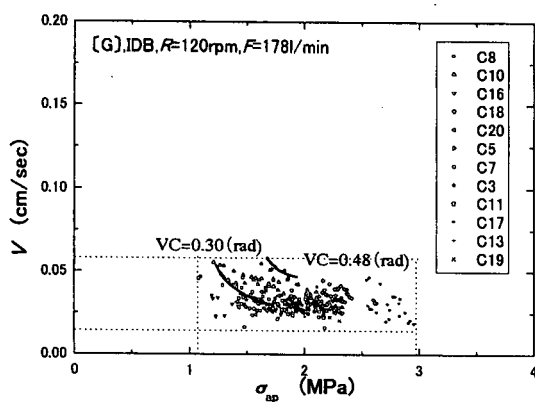
(b) 砂質土 [S]



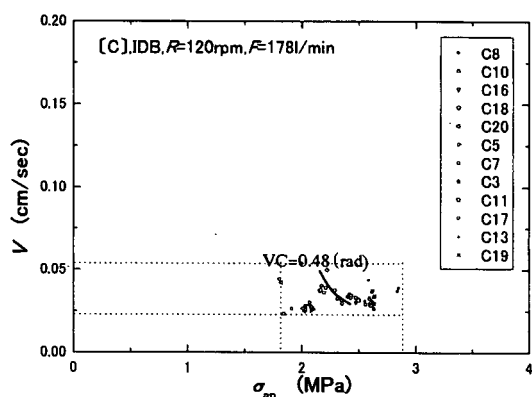
(c) 砂礫 [SG]



(d) 粘性土 [C]



(e) 礫 [G]



(f) 谷ツ粘土 [Cy]

図-6 一定制御過程における V と σ_{ap} の関係

③ 調整制御過程の検討

掘進時間の短縮を目的として速度調整ハンドル VC を操作した箇所の抽出を行い、その判断・制御過程を検討する。次に、各地盤に対する VC の制御の頻度、制御の必要性を認識する条件、制御による掘進速度 V の変化を検討する。

5. 検討結果

(1) 一定制御条件における検討結果

図-6 に地盤の種類毎の掘進速度 V と見かけの軸応力 σ_{ap} の関係を示す。各孔または VC の値毎に、見かけの軸応力 σ_{ap} が大きくなるに伴って、掘進速度 V が低下する傾向がある。 V と σ_{ap} の積は概ね一定値であるので、両変数の間に双曲線の関係が認められる。一定の VC に対して、各地盤内の非一様性によって局部的に硬く（掘りにくく）なれば軸力（見かけの軸応力 σ_{ap} ）は大きくなり、掘進速度 V が小さくなる傾向を示す。 V と σ_{ap} の積は、速度調整ハンドルの回転量 VC の大きさに依存する。

図-7 に各地盤に対する σ_{ap} と V の範囲（最大値・最小値）と平均値 σ_{ap}^* と V を示す。粘性土 [C] & [Cy] や礫 [G] では V (=0.040~0.045cm/sec) が他の地盤 (V =0.055~0.065cm/sec) に比べてやや低い。粘性土は凍結し難いために硬い地盤に用いられるダイヤ・ビットが適さず、礫はその最大径が 10cm を超えて非常に硬質なためと考えられる。

フォアマンは、事前に得られた柱状図や最初の 2, 3 孔を掘削した経験に基づいてターゲットとする掘進速度を設定する。単に掘進速度を上げるためなら速度調整ハンドル VC を全開にすれば良いが、過剰給圧によりカッティングスの排出不良やコア詰まりなどのリスクが高まってしまう。このターゲットとする値は、平均の掘進速度 V として反映されているはずである。

(2) 制御過程の分析結果

フォアマンが行う判断・制御過程のフローを図-8 に示す。ステップ1で、一定制御過程において、掘進速度 V とターゲットとする V の値との乖離をフォアマンが敏感に感じ取り、制御が必要か否かを判断する。ステップ2では、掘削状況に対する適切な制御の内容を選択・決定し、制御を実行する。ステップ3では、制御の実効が十分に上がったかどうかを判断して、制御を終了し、再び一定制御過程（順調な掘削）に戻る。

各地盤に対する掘進時間の短縮を目的とした制御の頻度（掘削距離 1m 当たりの制御回数）を図-9 に示す。砂質土 [S] では一度も制御せず、火山灰質粘性土 [V] の制御頻度も低い。地盤の均一性が高く掘進速度 V の変動が少ないためである。一方、礫 [G] や砂礫 [SG] は地盤の不均一性が高く（強度のばらつきが大きく）、また粘性土 [C] や谷津粘土 [Cy] は前述したようにビットの選択が適切でないために制御の頻度が高いと推測される。

横軸に速度調整ハンドル VC の制御前の回転量 V_{c0} で制御後の回転量 V_{c1} を除した値を、縦軸に VC の制御直前の掘進速度 V_0 を一定制御過程における平均的な掘進速度 V で除した値を図-10 に示す。 V_0 が V より平均的に 2 割程度低くなると、調整のために制御が必要だと判断されていることが分かる。ただし、この V_0/V の値のばらつ

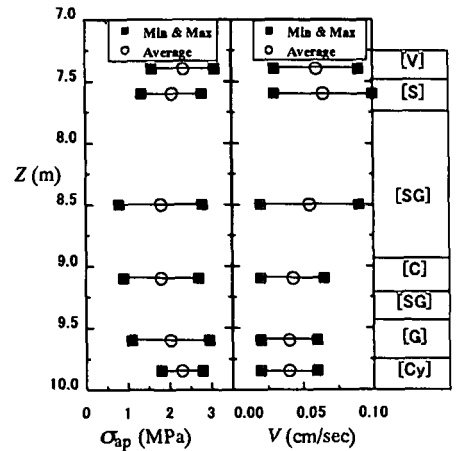


図-7 地盤の種類と σ_{ap} と V

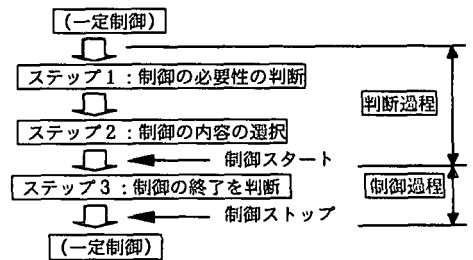


図-8 判断・制御過程のフロー

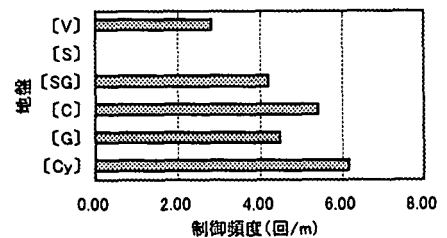


図-9 掘進時間短縮のための制御の頻度

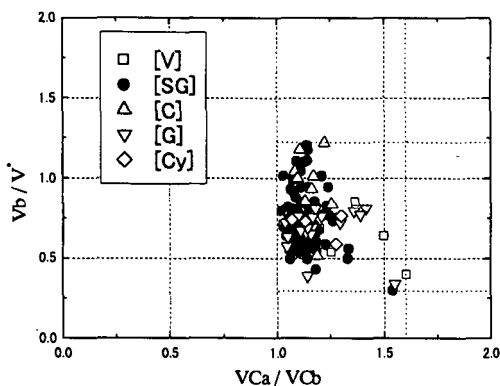


図-10 V_b/V と VC_a/VC_b の関係

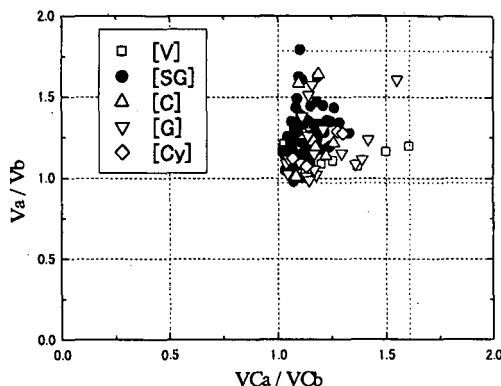


図-11 V_a/V_b と VC_a/VC_b の関係

きは、[V] で 20~60%、[SG] で 20~70%、[C] で 20%~50%、[G] で 20~70%、[Cy] で 25~40%と大きい。また、[SG] や [C] では、必ずしも V_b が V よりも小さくなった場合に制御を行うとは限らない。この理由は、フォアマンがさまざまな理由により意図的に掘進速度を増加させた結果であると推測される。また掘進速度の低下率 $(1 - V_b/V)$ が大きい (V_b/V が小さい) ほど、制御率 VC_a/VC_b が大きくなる傾向がある。ターゲットとする掘進速度 V に近づけるため、遅れが著しいほど調整量を多くする判断が働いているからである。

横軸に VC の制御直前の回転量 VC_b で制御終了後の回転量 VC_a を除した値を、縦軸には VC の制御終了後の掘進速度 V_a を制御直前の掘進速度 V_b で除した値を図-11 に示す。制御を行った後に、 V_a/V_b の値が [V] で 10~60%、[SG] で 2~80%、[C] で 0~70%、[G] で 0~60%、[Cy] で 10~30% となり、概ねターゲットとする掘進速度 V にまで増加している。調整量に応じて、速度の回復が計られているからである。

6. 掘進制御モデル

(1) ボーリングマシンの軸方向の仕事率

図-6 において、一定制御過程 (VC 一定) において掘進速度 V と見かけの軸応力 σ_{ap} の関係が双曲線 ($V \times \sigma_{ap} = \text{一定}$ 、図-12 参照) で近似できることを指摘した。そこで、この V と σ_{ap} の積を見かけの仕事率 $E (= V \times \sigma_{ap})$ と定義した。見かけの軸応力 (単位掘削断面積当たりの軸力) による単位時間 (1sec) 当たりの仕事量であるから、軸方向の仕事率 ($\text{MPa} \times \text{cm/sec}$) に相当する概念である。

砂礫 [SG] について、軸方向の仕事率 $E (= V \times \sigma_{ap})$ と速度調整ハンドルの回転量 VC の関係を図-13 に例示する。VC の増加に伴って E がほぼ線形に増加していることが分かる。この関係は各地盤毎に比較的ばらつきが小さく、フォアマンは掘進速度 V を制御するために、間接的に軸方向の仕事率 E を地盤の種類に応じて制御しているとも理解できる。

(2) 掘進制御モデルの提案

一定制御過程と調整制御過程の検討結果を元に、図-14 に掘進制御モデルを提案する。この掘進制御のモデルは、次の3つの構成要素から成り立つ。①ターゲットとする掘進速度 V 、②速度調整ハンドルの回転量 VC、③地盤の強さ (切削抵抗) である。

一定制御過程では、理想的には平均的またはターゲット

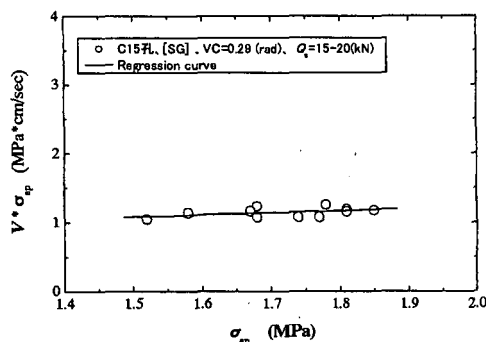


図-12 $E (V \times \sigma_{ap})$ と σ_{ap} の関係の例

となる掘進速度 V 、つまり O 点の状態にあり、仕事率 E が一定の双曲線上を移動する。地盤の強さ（切削抵抗）が大きくなると B 点に移動するが（一定制御過程）、掘進速度 V を一定に保つために VC を制御すると B' 点に移動する。逆に地盤の強さ（切削抵抗）が小さくなると A 点に移動し（一定制御過程）、ターゲットの値 V^* に戻すために VC を制御すると A' 点に移動する。ここで、図-13 が VC の制御量を算定する関係となるが、地盤とボーリングマシンやドリリング・ツールズに依存すると考えられる。一方、 VC を制御しない（ E が一定）状態の一定制御過程における V と σ_{ap} の関係は双曲線の関係（ $V \times \sigma_{ap} = \text{一定}$ 、図-12 参照）にあることが示されている。

地盤に応じて設定するターゲットの掘進速度 V の値、 V からどの程度乖離したら制御動作を行うのかなどは、熟練フォアマンの制御データを収集して分析する必要がある。また、地盤の強さ（切削抵抗）が一定制御過程における V または σ_{ap} に及ぼす影響を検討する必要がある。

7. まとめ

計測ボーリングの実験を実施して、一定制御過程と調整制御過程に分けて、掘削変数とフォアマンが制御する項目の計測結果を分析した。その結果、掘進速度 V と見かけの軸応力 σ_{ap} の関係が双曲線で近似できることを示し、軸方向の仕事率 $E = \sigma_{ap} \times V$ を導入した。また、フォアマンが制御する上でターゲットとする掘進速度 V を検討した。さらに、ターゲットとする掘進速度 V から乖離した場合に制御の必要性を判断する条件と、 V に近づけるために速度調整ハンドルを回転する量 VC を定量的に分析した。最後に、これらの検討を踏まえて、一定制御過程と調整制御過程を組み合わせた掘進制御のモデルを提案した。

掘進制御のモデル化は、ボーリングマシンの自動制御技術を開発する上で、判断や制御のプロセスを決定するのに有効である。今後、計測ボーリング技術を利用して多くの掘削データを収集し、その実効的なアルゴリズムを構築することが望まれる。

なお、間舎氏（日本工営（株））に試料に関するデータをいただいた。ここに感謝の意を称します。

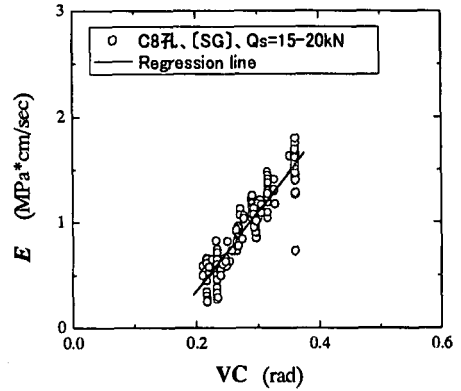


図-13 E と VC の関係の一例

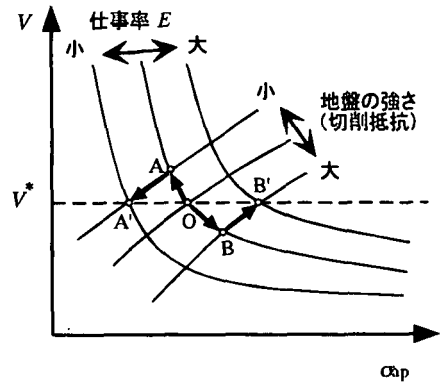


図-14 掘進制御モデル

- 参考文献： 1) 谷和夫：電力中央研究所における「計測ボーリング」技術の開発経緯、電力土木、278号、pp.117-201、1998。 2) 唐沢廣和・大野哲二・三澤茂夫：ビット振動による岩石強度の推定、資源と素材、Vol.110、pp.1221-1226、1996。 3) 眞本悠一・谷和夫：ボーリング掘削における軸力制御に対する掘削効率の検討、第11回、岩の力学国内シンポジウム、K01、2002。 4) 谷和夫：ボーリング技術の高度化に関する研究「計測ボーリングシステム」の開発と堆積軟岩における実証実験、電力中央研究所報告、No.U98021、1999。 5) 建設産業調査会：土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック、414p、1985。 6) (社)全国地質調査業協会連合会：ボーリングポケットブック、第2章2.2節、1999。 7) 眞本悠一・谷和夫・金子進：計測ボーリングによる掘進中のトラブルの発生および回避作業をモニタリングした事例、土と基礎、Vol.50、No.11、pp9-11、2002。 8) 眞本悠一：ボーリング機械の自動制御を開発するための実験的研究、横浜国立大学大学院修士論文、2002。