

6. 油圧ショベルの車体センサーデータを用いた掘削土の土質判別

株式会社	小松製作所	○森澤	直樹
株式会社	小松製作所	今西	将也
株式会社	小松製作所	柳下	正紀
株式会社	小松製作所	千葉	貞一郎
株式会社	小松製作所	山元	弘
(国研)	土木研究所	橋本	毅
(国研)	土木研究所	遠藤	大輔

1. はじめに

土木施工は新たな構造物を築くことで生活を便利にするだけではなく、災害発生時の復旧など、社会生活を支える上でも重要な役割を担っている。しかし、近年の少子高齢化による労働人口の減少¹⁾、若手の担い手不足等様々な問題に直面している。その問題を解決するには、現場の生産性向上は欠かせない。建設現場でも ICT の全面的な利用により生産性向上を行う取り組みである *i-Construction*²⁾等の活動が行われている。

その代表事例にブルドーザや油圧ショベルでの ICT 施工があり、事前の丁張りなどの補助作業を無くし、成形・仕上げ工程では自動化によって技能に頼らず、同じ精度で施工を可能にすることで施工効率を向上させている。しかし、その中でも油圧ショベルによる掘削工程での自動化は、実使用の観点からの課題が多いが、その根本原因は掘削対象地盤の土質にあると考えられる。掘削前の表面だけでは内部の土場状況はわからないため、ベテランのオペレータは掘削しながらその土質に合った適切な操作を適宜行っている。この掘削途中での操作を勘案しないと ICT 施工による自動掘削効率が低下する。この複雑な調整を機械が自動で行うためには、まず、機械自身が掘削中の土質を把握し、制御に反映する必要がある。

従来、掘削工程では、オペレータが自らの運転技能を磨き、その技能により効率を上げてきた。刻々と変化する土場の状況に対し、掘削を行いながら操作に対する機械の反応を人間の感覚で捉え、経験上最適と思われる操作を瞬時に行ってきた。ベテランオペレータの技能は、状況把握・判断から操作までの時間が早く、かつその操作のバリエーションおよびミスが少ない点で優れていると考える。一方、機械側はオペレータの運転のし易さという観点で操作性能や掘削力等の改善で進化を続けてきたが、今後は機械オペレータに依存しない機械

の進化という観点も注目されると考えられる。

そこで、技能差が出る感覚を機械側で正確に捉え、その時にオペレータが行う操作を機械に反映させることが可能になれば、様々な状況変化に機械自身での対応が可能になるはずである。その結果、ベテランオペレータに劣らない高効率の自動掘削の開発が可能になるであろう。

この様な視点で研究に着手するにあたり、社内のベテランオペレータ数名から掘削中の車体挙動の着目点と感覚での把握方法をヒアリングした。表-1 に、その中で多く挙がった項目を示す。掘削対象地盤の影響を受けて、車体に現れる現象から掘削対象の土質を人間の感覚を用いて認識している様子が明らかになった。つまり、人間の感覚によって土質判別を行っていると考えられる。

オペレータが感じている土質関連の感覚をセンサーデータで代用・表現できるようにすることが、掘削の高度自動化の実現のための第一歩であると筆者らは考えた。一方、現状の土質判別は、施工前の地質調査時と、掘削後の発生土を利用する時の掘削前後という主に 2 工程で行われている。この研究のもう一つの狙いとして、掘削しているその時点での土質判別が行えるようになれば、そのデータの活用によって、施工計画から完工に至るまで一貫した土質の管理も可能になり、機械の生産性向上に留まらず、施工プロセス全体の生産性向上にも寄与すると期待している。

ICT 施工に対応するため様々なセンサが建設機械に取り付けられたことに加え、昨今の ICT 技術を用いることにより、オペレータの感覚をセンサーデータで置き換えることが可能になってきている。本稿では、今までオペレータが感覚によって実施していた土質判別は建設機械側で定量的に可能になるという仮説を元に実機での検証実験を行った。

表-1 オペレータの掘削中の着目点

車体に現れる現象	オペレータによる現象の把握方法	
	使用する感覚	捉え方
・作業機の動きや速度変化	・視覚	(レバー入力に対して) ・遅い⇒硬い、早い⇒柔らかい
・刃先の貫入量や掘削深さ	・視覚	(レバー入力に対して) ・少ない⇒硬い、多い⇒柔らかい
・1回の掘削土量(満杯率や荷姿)	・視覚	・低い⇒硬い、高い⇒柔らかい
・車体振動や車体傾斜	・視覚 ・体感	・大きい⇒硬い、小さい⇒柔らかい ・前側が浮く⇒硬い、沈む⇒柔らかい

2. 仮説の検証方法

表-1に示す通りオペレータは視覚から多くの情報を把握していることから、第一にカメラ画像を用いる手法が考えられた。しかし、建設機械は悪天候や直射日光、夜間の稼働だけではなく、車体振動や粉塵の付着等、様々な外乱の影響を受けることが懸念される。そのため、ロボスタ性を考慮し、外界センサを用いずに内界センサのみでの実現を目指した(表-2)。

次に、土質については、硬度に着目して検証を実施する。硬度は掘削効率に大きな影響を与える。そのため、オペレータも自ずと硬度の把握を優先して行っていたと考える。

硬度の計測は、実験条件の水準間で同じ指標で評価できることを前提に、簡便かつ比較的硬い土壌まで計測が可能な計測器を検討した結果、簡易N値計を使用することにした。材料は、20tクラスの油圧ショベルにおいて掘削頻度が高い材料である、“砂質土”と“粘性土”を対象とした。

N値の増加と共に、掘削中の作業機速度は低下し、1回の掘削動作で得られる掘削土量も減少することが想定されるため、オペレータを固定し実験条件である土質を均質に揃え、N値違いの水準を多く準備することとした。つまり、管理した土場条件で、オペレータが通常行っている掘削作業を模擬して計測を行えば、センサデータと土質と関係が明確になると考えた。そこで、オペレータの感覚と相関が強いと考えられる掘削中のセンサデータと、その時の土質を突合せながら、結果の整理及び考察を進めて行くことにした。

表-2 着目点と車体の内界センサの関係

着目点	代用できそうな車体センサ	定量値
作業機の速度・動き	・IMU	・刃先速度/各シリンダ速度
バケットツースの貫入状況	・ポテンショセンサ ・シリンダストロークセンサ	・刃先座標の移動量
掘削の深さ	・シリンダ速度センサ	
一回の掘削土量	・パイロドメータ	・掘削重量

3. 実機での掘削実験の概要

3.1 使用車両

車両はコマツ(株式会社小松製作所)製20tクラスのICT油圧ショベルPC200i-11を用いた。標準バ

ケットを使用し、バケット容量は0.8m³(新JIS)である。図-1に車両の外観を示す。



図-1 PC200i-11 外観

3.2 掘削対象土質の作成および測定

コマツで保有している屋外試験場にある砂質土(砂)、砂質土(細粒分混じり)および粘性土の3種の材料フィールドにて実験を行った。車体左右方向に3m、前後方向に5m、深さ2m程度の掘削枿を作成し、硬さ水準作成時は敷き均し厚さ20~30cm程度で埋め戻し、バケット転圧を行いながら、なるべく深さ方向も均質になるよう注意し作成した。転圧で作成できる硬さの上限はあるため、より硬い条件は、長期間触っていない自然に締め固まった場所を利用して計測した。図-2に作成した水準の一例と、実験用に準備した掘削枿の模式図を示す。

(株)西日本試験機製の土研式貫入試験機を用いて、掘削箇所の表面を長手方向に3か所測定し、その簡易N値の平均値をその水準での硬さの指標とした。一般に簡易N値が50を超えると計測をやめるが、今回は土壌の素性を把握し比較するため、50を超えても規定貫入深さに到達するまで計測を継続した。

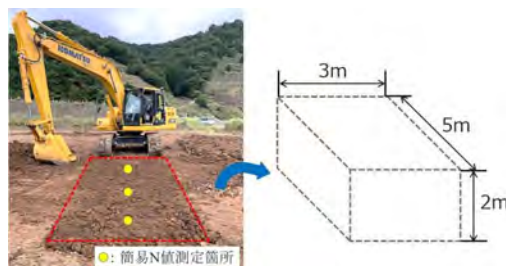


図-2 作成した水準の例と掘削枿の模式図

3.3 掘削方法およびオペレータ

図-3に掘削開始姿勢を示す。データのばらつきを防ぐ目的で、アーム最大伸ばし、バケット角度 θ も固定した姿勢を掘削開始姿勢として、同盤での掘削実験を行った。なお、バケットの角度 θ は事前に社内のテストオペレータの数名の掘削開始姿勢を確認した結果、大きな差異が無かったため、この角度で固定した。

車両の運転操作はコマツ内の車両の性能評価等を実施する部門に所属しているテストオペ

レータ2名（社内での経験歴9年_オペA，経験歴10年_オペB）が実施した。

掘削開始姿勢から掘削を開始し，図-4に示すような掘削終了後の持ち上げ操作後に静止するまでを1回の掘削とした。様々な材料および硬度で，オペレータには掘削方法の特段の指示は与えず，任意に掘削を行ってもらった。



図-3 掘削開始姿勢



図-4 掘削終了後の一例

3.4 車両センサ等のデータ計測環境

車両センサのデータは，車体のコントローラに接続し，CAN経由でノートパソコンにて計測を行った。図-5に主な車体センサの計測項目およびそのサンプリングレートを示す。

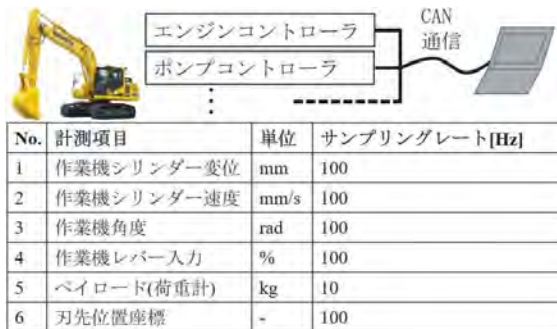


図-5 計測方法及び計測内容

4. 実機での掘削実験結果

掘削中のオペレータの着目点に基づき，掘削中の作業機速度，および1回の掘削土量として作業終了後の掘削重量を用いて整理を行った。図-6に簡易N値と掘削中の平均刃先速度との関係を，図-7に簡易N値と掘削終了後の掘削重量および掘削時間から算出した1時間当たりの生産量（作業効率）との関係を，材料とオペレータ別にプロットした。

掘削中の刃先の平均速度は，刃先の位置座標を用いて，直前の時刻における刃先位置と現在時刻における刃先位置の差分を，サンプリング周期で

除すことで速度として算出した。図-3の掘削開始の姿勢から，アームレバーを掘削側から戻すまでを“掘削中”に相当する時間と定義しその区間での解析を行った。また，掘削終了後に図-4の姿勢で静止した時の車体のペイロードメータの重量を掘削重量と定義し，上述の“掘削中”に相当する時間から1時間当たり作業量に換算した。一般に，作業量は，掘削，持ち上げ+旋回，排土，初期位置への戻りの操作から成るダンプトラックへの一連の積み込み作業相当のサイクルでの作業量をさすが，ここでは掘削工程に特化した作業量で算出している点に注意が必要である。

掘削中の刃先の平均速度（図-6）および，掘削重量から求めた作業効率（図-7）は，事前に計測した掘削土壌の簡易N値の値と良い相関があることが分かった。

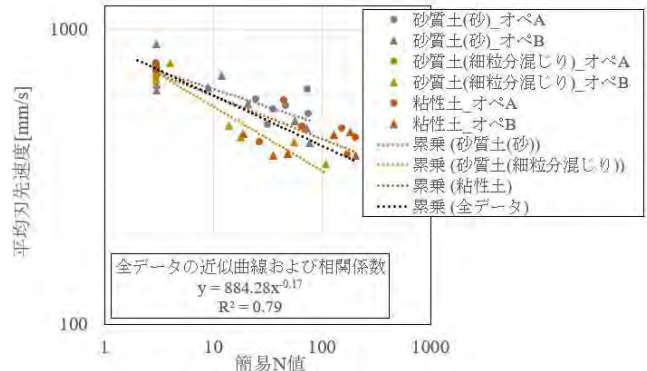


図-6 簡易N値と掘削中の平均刃先速度の関係

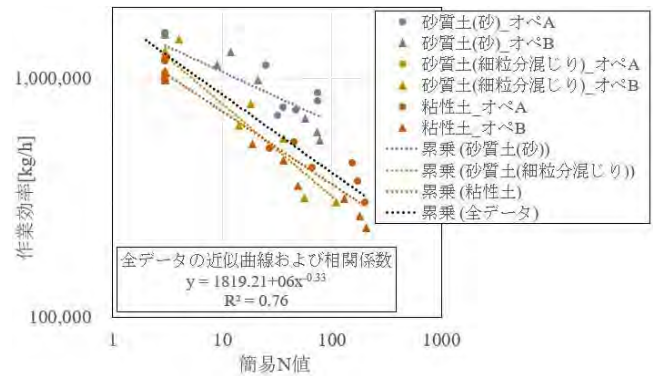


図-7 簡易N値と作業効率の関係

4.1 簡易N値と平均刃先速度の結果の考察

掘削中の刃先速度は，N値が高くなると低下する傾向が見られた。これは，事前に着目していたオペレータの感覚とも一致した。

上記の傾向をさらに深堀するため，掘削中の刃先軌跡に着目した考察を行う。その一例として，図-8に粘性土における簡易N値3と簡易N値49での掘削時の刃先の軌跡の違いを示す。最大掘削深さは，簡易N値3の時で952mm，簡易N値49の時に360mmと約2.6倍の差が見られた。簡易N値3の軌跡は，凹

凸が少なくスムーズに掘り進められているが、簡易N値49の軌跡には細かいレバー操作を行いながら掘削を進めるため、凹凸が多く見られた。

N値が3程度の柔らかい土壌では、貫入が容易なため、車体の掘削能力に対して余力を持ってバケットを満杯にすることが可能である。深く貫入させ過ぎて荷を抱え過ぎることによる負荷の増大に注意をしておけば、細かいレバー操作による技術介入が無くとも掘削速度は低下しない。一方、土壌が硬くなると、貫入時の抵抗が大きくなるため、掘削深さは浅くなる。土から受ける反力も大きいいため作業機が止まり易く、柔らかい土壌と同じ操作では掘ることは出来ない。オペレータは掘削速度を犠牲にしても、1回の掘削動作で少しでも多くの土量を獲得するため、掘削中の刃先角度や掘削深さを細かいレバー操作で調整し、負荷を適切に調整しながら時間をかけて掘削を行った。その結果、掘削中の刃先速度は低下した。

また、N値が大きくなると、オペレータ間の差異が大きくなった。これは、硬い土壌ほどオペレータ固有の運転技能による操作が多く介入するため、その結果として現れる刃先速度や掘削重量に影響を与えたと考える。

砂質土（砂）の掘削速度は、他の材料よりも早い傾向が見られた。これは、砂の成分が多くなると、粘着性が低下し、バケットへの掘削抵抗が減ったためであると推測する。

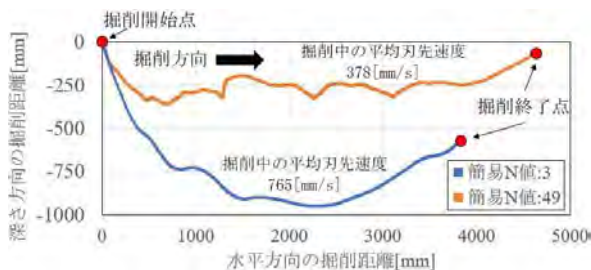


図-8 刃先の軌跡のN値による違い

4.2 簡易N値と作業効率の結果の考察

簡易N値が大きくなると、1回の掘削重量は減少した。また掘削中の速度も低下するため、掘削時間も長くなる。そのため、作業効率にもN値の違いによる差異が表れた。

図-9に掘削終了後にバケットが獲得した土の外観を側面から撮影した写真の一例を示す。N値の違いによって、バケットの満杯率に差異が見られた。

今回、ペイロードメータの掘削重量を使用して1回毎の掘削土量の比較を行った。しかし、材料の密度が大きく異なる場合、バケットの見かけ上の満杯率は同程度であっても、重量は大きく異なるため、重量だけで1回毎の掘削土量を比較すると誤った土質判別を行ってしまう可能性がある。そのた

め、重量に加え、体積も同時に計測して比較する等、評価方法の検討は今後の課題である。

また、オペレータは社内での経験年数が同程度の2名に固定してデータを取得しているが、人間が操作するのでばらつきは出やすい。特にオペレータの技能差により1回の掘削動作で獲得できる土量に変化することも考えられるため、掘削中の速度も含め、オペレータの技能差に水準を振った比較・検証も今後必要であると考えられる。



図-9 掘削終了後のバケットの荷姿（粘性土）

5. オペレータの操作の影響を除いた掘削実験

前章までの実験では、掘削開始姿勢だけを固定し、掘削操作はオペレータ任せの条件でデータを取得したため、得られたデータにはオペレータ固有の操作によるばらつきが反映されてしまうことが否めない。

そこで、本章ではオペレータによる操作のばらつきを極力抑える実験方法（以下、専用操作）を検討し、その方法で得た計測結果と4章で得た結果とを比較することで結果の妥当性の検証を行うことにした。また、オペレータの操作に依存しない単純化した方法での判別を可能にすることは、自動・自律化へ向けて機械自身での判別を行うための一つの方法としても提案できるとも考えた。

5.1 操作方法の検討

図-10に簡易N値50程度の土壌における、前章までの実験での2人のテストオペレータの各操作レバーの入力状況の時系列データを示す。アーム・バケットのプラス域は掘削側を表し、ブームのプラス域は上げ側を表す。

まず、アームレバーについては、掘削開始と同時に中立状態から掘削側にレバーを入力した状態を掘削中も保持しており、オペレータの違いによる操作の差異は掘削工程全体で小さかった。バケットの操作は、掘削開始時に掘削側のレバー入力のタイミングは同じであるが、入力量やそれ以降の操作にはオペレータ間の差異が大きかった。ブーム操作もバケット操作と同様にオペレータによる差異が見られた。オペレータによっては掘削開始時にブームを下げ側に入力しているが、これはブームの押し下げ力を用いて、刃先を貫入させようとしたと推定する。

掘削開始時にオペレータはバケットの刃先を貫入させる動作を行い、その入力（操作）に対しての刃先の貫入量や作業機速度などを見て、瞬時に掘削対象土壌の状態把握を行っている。それ以降、レバー入力を微調整しながら、その推定した土質に合わせた動きで掘り進めていく。そのため、掘削途中～終了までの操作は、技能による操作介入が多くなるため、ばらつきが発生しやすい。従って、掘削開始時の刃先貫入の操作に着目して、オペレータのレバー入力操作をアーム掘削100%の急操作の入力のみ限定することで、操作のばらつきを抑えられると考えた。

前章までの結果（図-8参照）から、N値が変わると、掘削開始時の貫入量に違いが出ることは容易に推定が可能であった。そのため、アーム単独で動かした場合、円弧運動をすることを考慮し、バケットの刃の向きをその円弧の接線方法に一致させれば、抵抗が減少し、より貫入し易い姿勢となると考え、アーム最大伸ばし、バケット底面と、ブームトップピンおよびアームトップピンとの成す角度が $0.5\pi[\text{rad}]$ になる姿勢を掘削開始姿勢とした。

図-11にその掘削開始姿勢を示す。オペレータはこの姿勢からアーム掘削急操作のみを行い、油圧リリーフに到達した後に刃先が止まるまでレバーを保持する操作にて計測を行った。その他の実験方法・条件は3章と同一である。

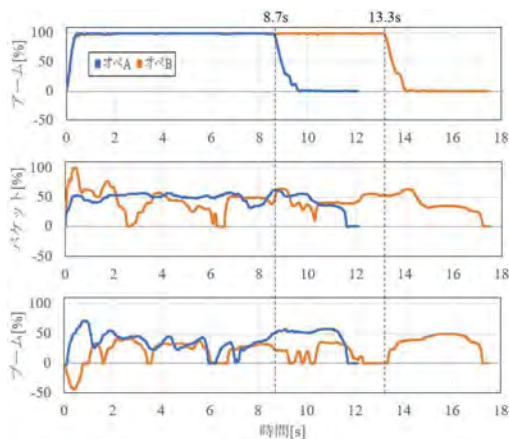


図-10 掘削中のレバー入力比較(N値50程度)



図-11 掘削開始姿勢

5.2 専用操作での掘削実験結果

図-12に、本専用操作を行った時の2名のオペレータのアームレバーの入力状況の時系列データを

示す。本専用操作の意図通り、レバー入力開始から保持する操作において、オペレータによる操作のばらつきは発生しなかった。なお、終了時間の差は、作業機が止まった後の終了の判断のタイミングが人によりずれたためであり、結果に影響は無い。

図-13に簡易N値と刃先が止まるまでの刃先の最大速度の関係を、図-14に簡易N値と刃先が止まるまでのバケットの掘削体積との関係を材料別に示す。4章の図-6では、貫入中の平均刃先速度で表しているが、図-13では最大速度で表している。これは、後述する図-16に示すように入力の瞬間の作業機の応答がその土壌の状況をよく表すと考えたためである。また、4章の図-7では作業効率で表しているが、図-14では掘削体積で表している。これは、ペイロードメータによる掘削重量は、持ち上げないと正しく測定ができないためである。そこで図-14では、刃先停止時の貫入深さとバケット形状から体積を算出し、その体積を掘削体積として用いた（図-14中の掘削体積の概略図参照）。ここで、作業機が止まるまでの時間を掘削時間と見なして効率に換算する方法も検討したが、N値が低いと掘削体積は多くなる一方、作業機が止まるまでの時間も長くなる傾向があり、特徴が埋もれ易かったため、見た目にもわかりやすい掘削体積で表すこととした。図-15に、その例として刃先停止時の土の硬さ違いによるバケットの貫入状況の外観を側面から撮影した写真を示す。

図-13、14と4章の図-6、7を比較したところ、本章の専用操作においても、4章のオペレータの任意操作での結果と同様に、簡易N値との相関があることが判明した。

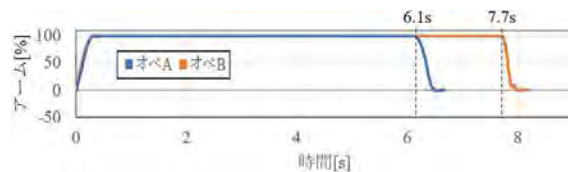


図-12 本操作でのレバー入力比較(アームのみ)

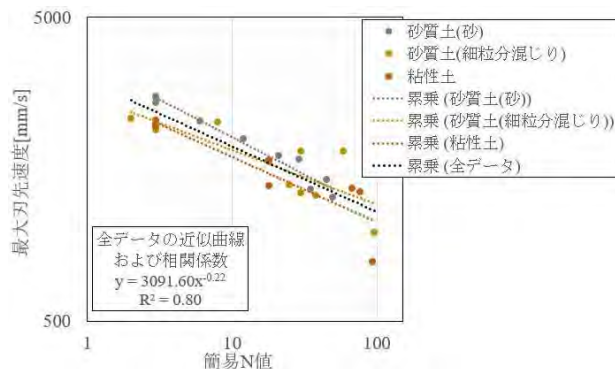


図-13 簡易N値と最大速度の関係

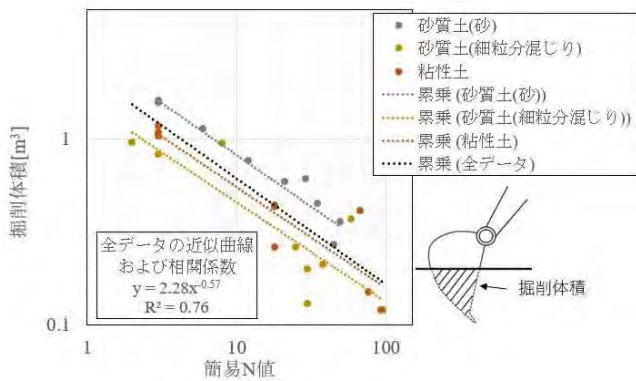


図-14 簡易N値と掘削体積の関係

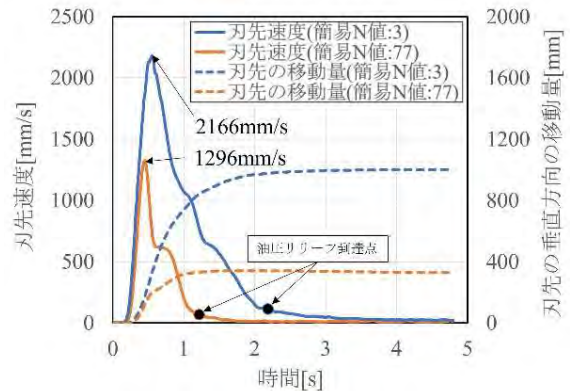


図-16 貫入操作時の刃先の速度の変化



図-15 刃先停止時のバケットの貫入状況の比較

5.3 専用操作での掘削実験結果の考察

図-16に簡易N値が3と77の時の刃先速度の時系列データおよび第2軸に刃先の移動量を示す。簡易N値の値に関わらず、刃先速度は、開始後に急速に上昇しピークに達した。

簡易N値が低いと、貫入後にバケットに入った土が抵抗になることで刃先の速度は徐々に低下し、最終的にその負荷がアームの掘削能力を超過し、停止してしまうが、貫入量は大きい。一方、簡易N値が高くなると掘削対象土壌に刃先を十分に貫入させることができないまま、刃先は停止した。

本専用操作で得られた刃先の最大速度や掘削体積は、掘削対象土の硬度差による貫入性の差異をよく表した。これは、オペレータによる任意操作であっても掘削開始時の貫入の挙動に着目すれば、同様に土質判別が実現出来る可能性を示唆している。掘削工程を自動化するという観点からも、掘削工程の早い段階で土質判別を行えたほうが、その後の掘削工程の制御に反映させることが出来るという点で都合が良い。

オペレータが乗車して操作する限りは、オペレータに任意に掘削させたデータから土質を評価できる方が、本章で述べた専用操作よりも利便性は高い。ただし、今後、自動化や自律化が進展した時に、専用操作が必要になる可能性がある。例えば、油圧ショベルが初めて侵入する場所で、事前に足場の軟弱度を調べる時にはこの専用操作を使用して土質判別を行うなど、目的に応じた運用方法の工夫によって判別精度を向上できる可能性がある。

6. 結論

オペレータの感覚をセンサデータで置き換えることにより、建設機械側で土質判別が実現できないか検証を行うため、3種類の材料および土壌硬さを変えた水準で、実機での掘削実験を行った。

その結果、掘削土質の硬さの指標の一つである簡易N値は、車体センサから得られる掘削中の平均刃先速度および掘削重量から求めた作業効率と相関が見られた。このことから、車体の内界センサデータのみで土質判別は出来る可能性が示された。

また、本稿ではオペレータの操作のばらつきを抑える操作方法を検討し、掘削実験を行った結果、オペレータによる任意操作と本専用操作による掘削データが同じ傾向にあることも確認出来た。これは、オペレータによる操作のばらつきを含んだ掘削中のデータでも土質判別が可能であることを示唆している。また、オペレータの操作に依存せず、機械自身での判別が出来る可能性も示唆した。

今回は硬度に特化して“土質判別”の一部の検証を行ったが、他にも掘削中のオペレータの感覚は多数ある。それらを今回同様にセンサデータでの置き換えを行うと、硬度以外のパラメーターも判別が可能になるであろう。今後は、対象土質の拡大や、汎用性の追求など様々な課題に取り組み、ベテランオペレータに劣らない高度自動掘削の実現のための基礎技術の確立を目指し、引き続き検証・検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省(令和5年4月18日): 最近の建設業を巡る状況について【報告】,
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001602250.pdf>
- 2) 国土交通省(平成28年4月): i-Construction ～建設現場の生産性革命～,
<http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf>