

軟弱地盤における建設機械の走破性に関する基礎的実験

国立研究開発法人 土木研究所 ○山田 充

1. はじめに

土砂災害等の2次災害の可能性のある危険な現場の災害復旧工事では、建設機械のオペレータが建設機械に搭乗せずに安全な場所からカメラ画像等により建設機械を遠隔操作する「無人化施工」が適用されることが多い¹⁾。近年は、異常気象による水災害が急増し、無人化施工が水災害に適用されるケースも増加している。

水災害現場においては、地盤は軟弱である可能性が高く、車両がぬかるみにはまり走行不能におちいる、いわゆるスタックが特に懸念される。災害現場内で無人化施工機械がスタックすると、救出に侵入することが難しいため、機械の復旧作業は極めて困難となる。

スタックを回避するためには、走破性の高い新たな車両を開発することや、既存車両の走行可否を判定する手法を構築する等の方法が考えられる。これらを実現するためには、スタック現象の具体的な原理を解明することが重要と考えられる。スタック現象の具体的な原理を解明できれば、スタックに支配的な要素を抽出し、それに対応できる車両機構の開発や、それを測定することに適した測定機材、測定手法の構築を行うことができる。

車両のスタック現象に関する既往研究では、室内模型実験や、シミュレーションによる研究、乾燥した砂質土を対象とした研究が多い²⁾³⁾。スタック現象を解明するためには、実際の車両を用いた実験や、スタックリスクが高いと考えられる高含水状態での地盤で実験を行うことが重要と考えられる。そこで本研究では、実際の建設機械を用い、屋外環境において、高含水地盤で車両の走破性に関する実験を行うこととした。

車両走行の力学モデルである Bekker 理論では、スタック現象は、車両の「牽引力」が「推進抵抗」を下回ったときに発生するとされている⁴⁾。すなわち、「牽引力」と「推進抵抗」の二つの力がどのように発生するのか、詳細に調査することがスタック現象の解明に有効と考えられる。

Bekker 理論では、牽引力 H は土の粘着力 c 、および内部摩擦角 ϕ の値が影響することを示している⁴⁾。一般に c 、 ϕ は土の含水比の増加、および密度の低下により減少する。含水比の高い軟弱な地盤では、走行地盤の c 、 ϕ 値が減少し、牽引力が低

下し、スタックに至ることが考えられる。本研究では具体的に、土の密度と含水比が牽引力にどのような影響を与えるのか、土の密度と含水比を変化させ車両の牽引力を測定し調査するものとした。

また、Bekker 理論では、推進抵抗の主要な要素として、締固め抵抗 R_c 、および排土抵抗 R_b の二つがあること、締固め抵抗 R_c 、および排土抵抗 R_b は車両の沈下量が影響することを示している⁴⁾。すなわち、車両沈下を調査することが推進抵抗の発生メカニズムの解明に有効と考えられる。本研究では、車両沈下量と走行回数、地盤支持力、含水比、密度との関係性を調査するものとした。

2. 実験方法

2.1 車両牽引力の測定

実験は、茨城県つくば市の土木研究所構内において実施した。実験状況を図-1に示す。反力(12t級の油圧ショベル)とクローラダンプをワイヤロープでつなぎ、反力とワイヤロープとの接続部に50kNロードセル(TLB-50KNB)を設置し、動的ひずみ測定器(DRA-30A)を用い、100Hzでロードセルの荷重値を測定した。実験は、ワイヤロープがたるんでいる状態からスタートし、クローラダンプをゆっくりと走行させ静かにワイヤロープを緊張させたのち、急激にスリップが起こらないように可能な限り少ない量でアクセル開度を上げていくようにして実施した。スリップが起こった時点でアクセル開度を固定し、その後、約1回転クローラを空転スリップさせたのちアクセルを抜いて実験終了とした。アクセルのコントロールはオペレータが感覚で行った。実験は同じ場所で3回実施した。実験に用いたクローラダンプの主要諸元を表-1に示す⁵⁾。

幅3m、長さ6m、深さ1mのピットを造成し、底面に厚さ0.5mに実験材料を敷均し、実験地盤を作成した。実験地盤に用いた土材料の基本物性値を表-2に示す。実験では締固め施工方法と含水比を変化させた3ケースの実験地盤を作成した。表-3に各ケースの実験地盤の作成条件を示す。

コーンペネトロメータを用い、実験地盤のコーン指数を測定した。図-2にコーンペネトロメータの外観を示す。コーンペネトロメータは、ロッドの先端に円錐(コーン)を有する測定装置である。コ

ーンを人力で 1cm /秒の速度で垂直に測定地盤に貫入し、貫入抵抗を測定する。測定された貫入抵抗はコーン指数と定義される。コーン指数は車両の走破性、いわゆるトラフィカビリティの判定指標とされている⁶⁾⁷⁾。コーン指数は実験前後に3点測定した。実験後のコーン指数は車両の履帯の走行跡で測定した。

ビデオカメラにより実験の全体状況、およびクローラ付近の近接動画を撮影した。実験終了後に走行跡の深さをスケールで3点測定した。地盤表面からラグ(クローラ表面の突起)先端までの深さを測定した。



図-1 実験状況(牽引力測定)

表-2 実験に用いた土材料の基本物性値

| 項目 | 数値 | |
|--------------------|--------------------|------|
| 土粒子密度(g/cm^3) | 2.754 | |
| 自然含水比(%) | 73.7 | |
| 粒度分布 | 2mm以上(%) | 10.8 |
| | 2mm~75 μ mm(%) | 35.4 |
| | 75 μ mm以下(%) | 53.8 |
| 地盤材料の分類記号 | MH | |
| 液性限界(%) | 119.7 | |
| 塑性限界(%) | 67.6 | |
| 最大乾燥密度(g/cm^3) | 1.761 | |
| 最適含水比(%) | 16.7 | |

表-1 クローラダンプ主要諸元

| 項目 | 数値 |
|------|---------|
| 全長 | 3.2m |
| 車幅 | 1.7m |
| 高さ | 1.8m |
| 車両重量 | 2.1t |
| 積載重量 | 2.5t |
| 接地圧力 | 55.2kPa |

表-3 実験条件一覧(牽引力測定)

| | 締めめ方法 | 含水調整 | 攪拌方法 |
|------|-----------|-------|-------|
| ケース1 | プレートコンパクタ | 自然含水比 | 無し |
| ケース2 | 無し(敷均しのみ) | 自然含水比 | 無し |
| ケース3 | 無し(敷均しのみ) | 加水 | バックホウ |

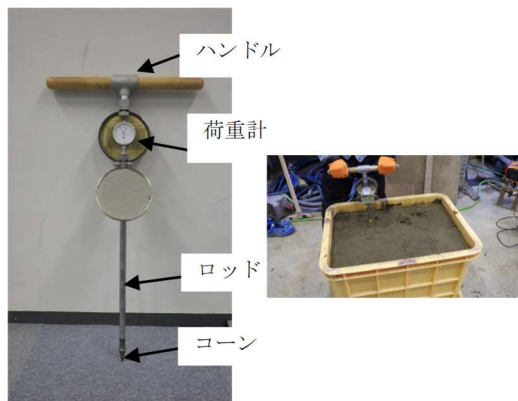


図-2 コーンペネトロメータ

2.2 車両沈下量の測定

実験は、茨城県つくば市の土木研究所構内において実施した。幅 3m、長さ 6m、深さ 1m のピットを造成し、底面に厚さ 0.5m に実験材料を敷均し、実験地盤を作成した。造成したピット内を、クローラダンプを一定速度(時速約 2km)で、直線走行で通過させた。実験状況を図-3 に示す。

締めめ施工方法と含水比を変化させた 3 ケースの実験地盤を作成した。表-4 に各ケースの実験地盤の作成条件を示す。実験に用いた土材料、およびクローラダンプは「2.1 車両牽引力の調査」と同じである(表-1、表-2)。

走行回数 0, 1, 3, 5, 10 回で、車両の沈下量、およびコーン指数を測定した。車両通過後のコーン指数は車両走行跡で測定した。車両沈下量は、地盤表面からラグ先端までの深さとして測定した。走行回数 1 回目はスケールを用い測定し、それ以降はレーザ水準器を用い、車両中央付近に定めた一定の場所で沈下量の増減分を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 車両牽引力の測定

図-4 に牽引力の測定結果を示す。牽引力の結果は測定 3 回目を典型例として示す。グラフ上の矢印はスリップ発生を示す。スリップ発生は撮影した動画より確認した。図-5 にコーン指数の測定結果を示す。コーン指数は貫入深さ毎の 3 点の平均値である。実験後のコーン指数は走行跡の測定結果の深さより測定データを示している。走行跡の深さの測定結果は、3 点の平均値で、ケース 1 で 0.10m、ケース 2 で 0.18m、ケース 3 で 0.22m であった。

図-4 よりケース 1、ケース 2 では、スリップ直前に最大牽引力が発生し、スリップ後に牽引力がやや低下し、波打つ傾向が見受けられた。一般に静止摩擦力にくらべ動摩擦力は小さい。最大牽引力



図-3 実験状況(車両沈下量測定)

表-4 実験条件一覧(車両沈下量測定)

| | 締めめ方法 | 含水調整 | 攪拌方法 |
|------|-----------|-------|-------|
| ケース4 | 無し(敷均しのみ) | 自然含水比 | 無し |
| ケース5 | 無し(敷均しのみ) | 加水 | 無し |
| ケース6 | 無し(敷均しのみ) | 加水 | バックホウ |

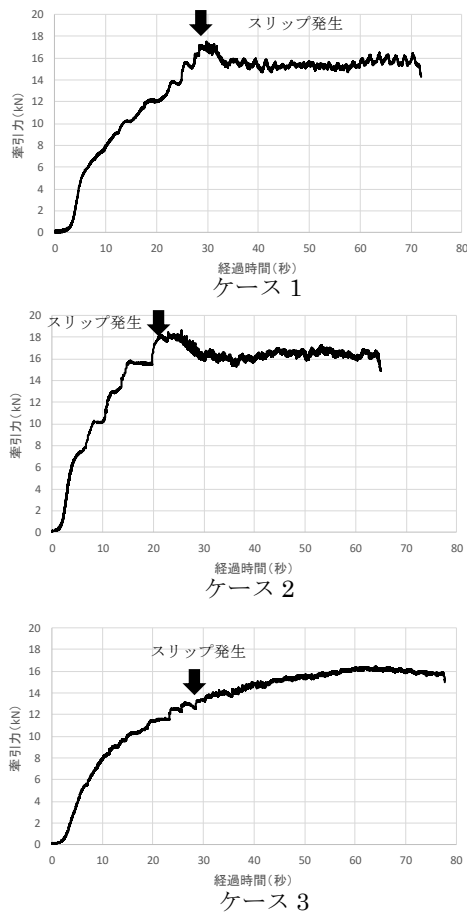


図-4 牽引力の測定結果

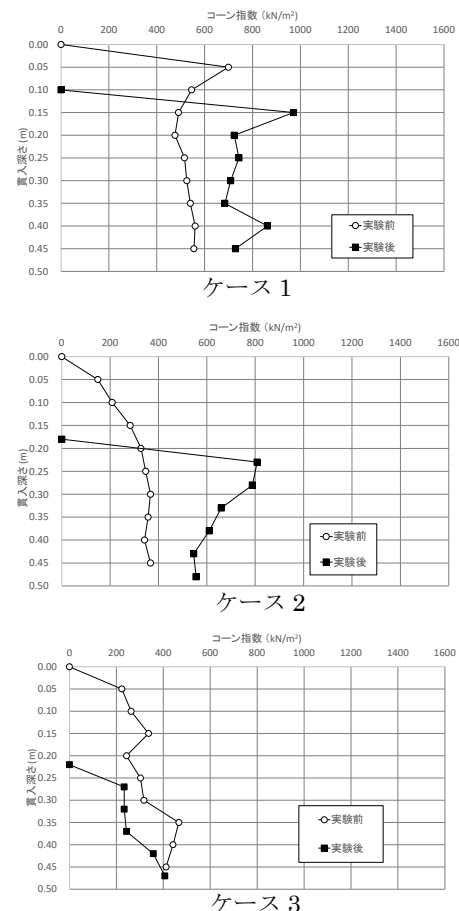


図-5 コーン指数の測定結果（牽引力測定実験）

がスリップ直前に発生し、スリップ後に牽引力が低下するのは、地盤面とクローラの摩擦力が静止摩擦力から動摩擦力に変化したことが一要因と考えられる。スリップ後の牽引力の波うちは、スリップ後の空転により、ラグが新たに地盤面に接触するたびに発生したと考えられる。

図-4よりケース1とケース2の最大牽引力、およびスリップ後の牽引力にはさほど大きな差は見受けられなかった。ケース1とケース2は同じ自然含水状態の材料を用い、ケース1は締め固めを行い、ケース2は敷き均しのみで構築した。図-5より、ケース2において、実験前にくらべ実験後のコーン指数の値が大きくなり、ケース1の実験後のコーン指数の値に近づく傾向が見受けられた。実験前には地盤密度が低くコーン指数が小さかったが、車両重量により、実験地盤が締め固められ地盤の強度が増加し、牽引力がケース1と同程度となったものと考えられる。

図-4より、ケース3では、スリップ前後で牽引力が連続的に増加し、最大牽引力はスリップ中に測定された。図-5よりケース3では実験前後でコーン指数が最も小さく、地盤が軟弱だったと考えられる。スリップ前後で牽引力が連続的となったのは、軟弱な地盤条件ではクローラと地盤面の間にさほど摩擦力が働かず、スリップ前後の静止摩擦力と動摩擦力がいずれも小さかったことが考えられる。最大牽引力がスリップ中に発生したのは、実験地盤が軟弱だったため c 、 ϕ の値が著しく小さく、スリップ直前の牽引力が、スリップ後の牽引力より小さくなったためと考えられる。スリップ後の牽引力の主要な発生要因としてラグによる掘削抵抗が考えられる。ケース3は軟弱でスタックリスクが高い地盤条件と考えられる。ケース3の牽引力発生要因について引き続き詳細に検討する必要があると考えられる。

3.2 車両沈下量の測定

図-6に各ケースの走行回数毎の車両沈下量を示す。図-7には各ケースの走行回数毎のコーン指数を示す。コーン指数は3点の平均値である。ケース4のコーン指数は、走行3回目以降は貫入不可であった。また、ケース6は走行0回目のコーン指数の測定を行っていない。

図-6より、全てのケースで、車両の沈下量は走行回数3回以内で概ね一定の沈下量に収束する傾向が見受けられた。地盤の支持力と車両重量のバランスのとれるところまで沈下し、それ以上は走行回数に関わらず沈下が生じなかったと考えられる。

図-7より、コーン指数の値は、車両走行回数の増加により、若干増加するか、変化しない傾向が見受けられた。一般に軟弱地盤では、走行回数に伴い地盤の走行性は悪化すると考えられている。本実

験の地盤条件においては、走行回数に伴い車両走行性は悪化しなかったものと考えられる。今後、どのような地盤条件で走行回数に伴い走行性が悪化するのか、詳細に検討する必要があると考えられる。

図-7 より車両沈下量はコーン指数が最も小さいケース 6 で最大となり、コーン指数が最も大きいケース 4 で最小となった。コーン指数と車両沈下量に相関性があると考えられる。

ケース 4、ケース 5 は、沈下量が比較体小さかった。沈下は車両重量による締固めで生じたと考えられる。ケース 6 では 0.4m 程度の大きな沈下が生じた。ケース 6 は地盤がかなり軟弱だったため、

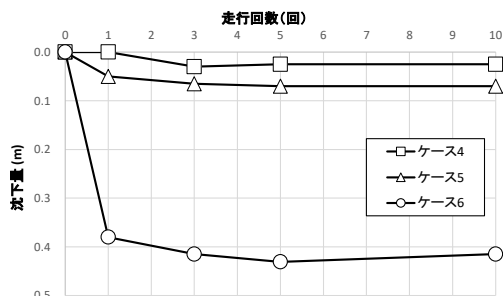
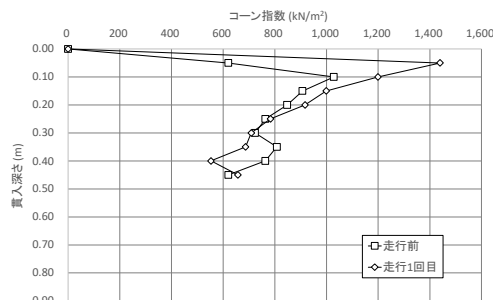
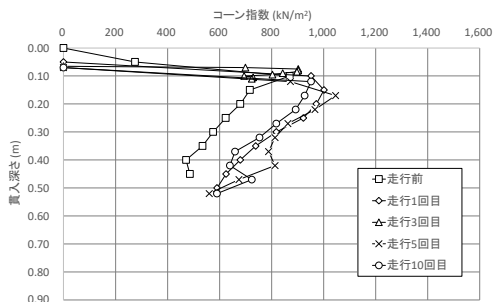


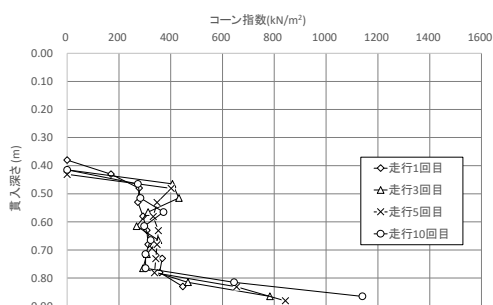
図-6 車両沈下量の測定結果



ケース 4



ケース 5



ケース 6

図-7 コーン指数測定結果 (沈下量測定実験)

車両重量により地盤材料が流動し、比較的大きな車両沈下量を生じたものと考えられる。ケース 6 のように、比較的大きな車両沈下が生じると、車両底面が地盤に接地し、スタックリスクが高くなると考えられる。どのような地盤条件において、地盤材料の流動が起こり大きな車両沈下を生ずるのか、今後詳細に検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本実験では、車両の牽引力と沈下量について、地盤の密度、含水比との関係性について調査した。その結果、以下の知見を得た。

- ・自然含水比の地盤では、最大牽引力がスリップ直前に発生し、スリップ発生後は牽引力が低下する傾向が見受けられた。
- ・高含水、低密度の地盤では、車両の牽引力がスリップ前後で連続的となり、最大牽引力がスリップ後に発生する傾向が見受けられた。
- ・繰り返し直線走行では、車両沈下量は一定の値に収束する傾向が見受けられた。
- ・コーン指数と車両沈下量に相関性が見受けられた。

5. おわりに

本実験では、一種類の土材料のみでの実験にとどまっている。今後、様々な土材料で実験を行う必要があると考えられる。一般に履帯車両は曲線走行時に地盤表層を削るため、曲線走行ではより大きな沈下が生じる可能性がある。今後、曲線走行による車両沈下について、詳細に検討する必要があると考えられる。本実験結果はスタック現象解明のための極めて基礎的な知見に過ぎない。スタック現象解明のためには、引き続き様々な検討に取り組む必要がある。

参考文献

- 1)建設無人化施工協会技術委員会：無人化施工の推移と展望，建設の施工企画，2006
- 2)江藤亮輔・山川淳也：路面形状が砂質土との相互作用に与える影響について，テラメカニクス第 39 号，pp.81-86，2019
- 3)堀江亮汰・平澤一暁：個別要素法を用いた履帯の所要動力の予測，テラメカニクス第 39 号，pp.67-72，2019
- 4)テラメカニクス研究会：履帯の設計工学，pp.31-36，2000
- 5) ヤ ン マ ー 株 式 会 社：
https://www.yanmar.com/media/jp/2015/catalog_old/c30r-2.pdf
- 6)日本道路協会：道路土工要領，pp.287，2009
- 7)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp. 290-295，2004