

3. 軟弱地盤のトラフィカビリティを把握する 土質調査試験について

次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） ○ 片野 浩司
次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） 橋本 毅
次世代無人化施工技術研究組合（国立研究開発法人 土木研究所） 山田 充

1. はじめに

遠隔・無人化施工は、噴火や地震災害時などの緊急工事への対応を目的として開発された我が国特有な技術であり、多くの実績がある。(写真-1)

無人化施工は、これまで主に火山災害（土石流）やドライな状態の環境に対応してきたが、近年は集中豪雨による水災害（地滑り、土石流、出水）が頻発しており、適用範囲の拡大が求められている。(写真-2)

これまで出水環境下での無人化施工では、水中部用途に改造されたバックホウやブルドーザーなどの作業機械が用いられてきた。

しかしながら、大規模な水災害、土石流災害では施工範囲が広がり、これらの作業機械だけではなく、資材等の運搬機械も必要になってきた。

そこで、浅水域から陸上にわたって移動可能で、数百メートルを効率よく走破可能な半水中型クローラダンプ（以下「重運搬ロボット」という。）の開発を行い、これに水中バックホウや水中ブルドーザーなどの作業機械と組み合わせることで、半水中での無人化施工を実現することにした。

開発の中で土木研究所では、走行地盤状況の観測として重運搬ロボットが走行する際、軟弱地盤の走破性を示すトラフィカビリティを検討する。平成27年度はトラフカビリティの指標として用いられているコーン指標値を他の評価量で代替できないかを把握する土質調査試験を行った。



雲仙普賢岳無人化施工 南大隅深層崩壊無人化施工
写真-1 無人化施工例¹⁾

なお、本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）の中で実施されている。

具体には、民間セクター及び関係法人とで設立した「次世代無人化施工技術研究組合」（略称UC-Tec）により研究開発を行うものである。



写真-2 徳島県阿南市を流れる那賀川の氾濫（H26年8月）¹⁾

2. 開発内容と実施項目

本研究では、無人化施工の適用範囲を、作業員が入り込むことが危険な浅水域・水際に拡大し、頻発する水災害への迅速な対応を可能とすることを目的とした。

その研究内容は、水深2m程度の水際や半水中部で、作業・運搬などの一連の施工を実現する無人化施工の実証システムの構築、及び浅水域から陸上にわたる数百メートルの多様な状況下を効率よく安定して走破可能な遠隔操作型重運搬ロボットの開発である。(図-1)

重運搬ロボットによる運搬作業を図-1に、開発イメージを図-2に示す。

また、開発項目として、次の5つの実施項目を設定している。

- ① 遠隔操作による半水中作業システムの構築と実証・評価
- ② 遠隔操作型重運搬ロボットの開発
- ③ 作業・走行支援センシング技術
- ④ 操作支援システム技術

- ⑤ 無人化施工・半水中作業のための基礎的ロボット技術の検討とシステム構築に向けたフイージビリティスタディ

従来型の遠隔操作水中バックホウ



+

組合せ



本開発による半水中運搬ロボット

遠隔操作室

図-1 重運搬ロボットによる運搬作業

【具体的研究開発内容】



図-2 開発イメージ

3. 作業・走行支援センシング技術

実施項目「③作業・走行支援センシング技術」では、半水中での遠隔操作による走行性や作業性を確保するための、走行経路の形状や地盤の状況を計測する技術の検討を行っている。

検討項目は次の3項目である。

- ① 走行地盤状況の観測
 - ・ 走行する地盤の状況の把握
- ② 空間把握技術（他組合員が担当）
 - ・ 混濁した水中で地形の形状を検知
 - ・ 電磁波レーダや緑色レーザによる水中探査技術
- ③ 位置・姿勢検知（他組合員が担当）
 - ・ リアルタイムで車体の位置や姿勢を計測
 - ・ GNSS/IMU（慣性計測装置）による水中向

け位置・姿勢検知システムを構築

土木研究所が担当している「①走行地盤状況の観測」の検討課題は、重運搬ロボットが走行する軟弱地盤のトラフィカビリティの把握である。平成27年度はトラフカビリティの指標として用いられているコーン指標値を他の評価値で代替できないか確認することとし、土木研究所の構内で土質調査試験を行った。

以下、平成27年度の結果を報告する。

4. 研究内容及び結果等

4.1 研究内容

トラフィカビリティの評価に利用されているコーン指数の代替指標候補として、市販されている計測機器を用いて、以下について相関性の検証を行った。密度、含水比については、コアサンプル採取により確認した。

- ① 地盤反力係数：重錘落下試験
（使用機器：インパクトソイルテスター IST-04（日東建設））
- ② せん断強度：ベーンせん断試験
（使用機器：ポケットペイン SH-63B（高容量2kgf）（筑波丸東））

試験の流れは、以下の通りである。

(1) 準備、敷均し

試験に使用した土の特性を表-1に示す。

山砂、川砂、粘性土（ここではローム）の各々について、図-3の供試体フレーム内に厚400mmになるように敷均し、試験用地盤を作製した。（写真-3）

敷均しにあたっては、湿地ブルドーザの走行に必要なコーン指数300~400kN/m²（道路土工要綱）を考慮し、締固め度85%、含水比を最適含水比から湿潤側に加水分、1層10cmで巻き出し、供試体フレーム内側につけた線を目印に地盤を作製した。

その際、事前に地盤材料の含水比を電子レンジ速乾法で確認し、不足分を加水、攪拌混合して1層毎の重量をクレーンスケールで測定しながら盛り立てた。この最適含水比から順に加水分する作業を4回行った。

表-1 試験に使用した土の特性

試料	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
川砂	1.740	14.8
山砂	1.746	16.7
ローム	0.989	54.0

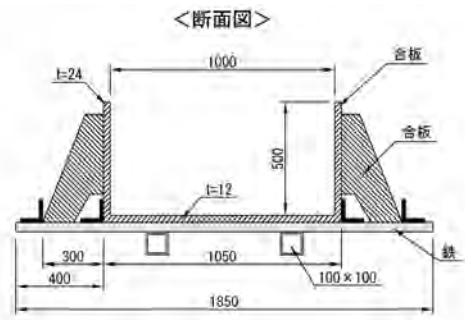


図-3 供試体フレームの仕様

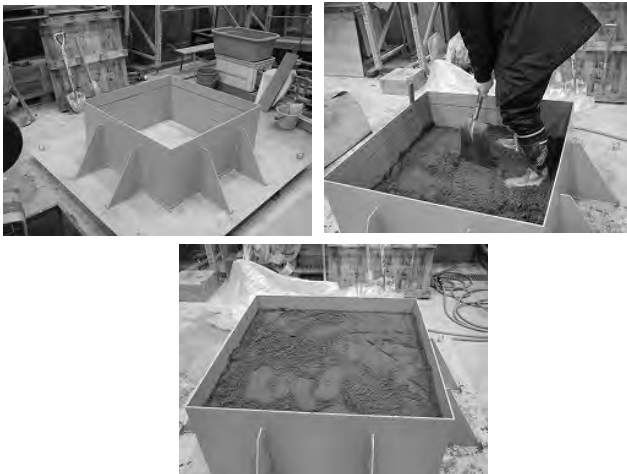


写真-3 供試体フレーム（左上）、敷均し作業（右上）、盛り立て完了（下）

(2) 測定

敷均し後、ベーンせん断試験、コーン指数試験、重錘落下試験、コアサンプル採取の順番に測定した。（写真-4）

供試体フレームの中で効率的に試験を行えるようにベーンせん断試験とコーン指数試験は、周辺地盤の影響が少ない場所で行った。コーン指数試験は、深さ方向に5cm毎に35cmまで読み取った。

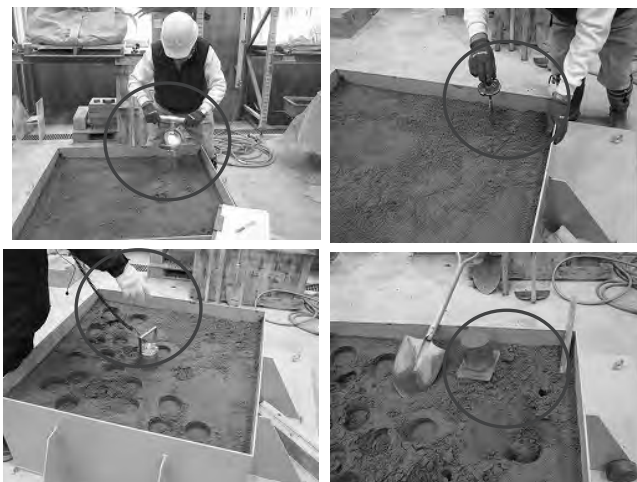


写真-4 コーン指数試験（左上）、ベーンせん断試験（右上）、重錘落下試験（左下）、コアサンプル採取（右下）

ベーンせん断試験は、羽の先端が地盤から10cm深さのところまで計測した。重錘落下試験は10回の測定の平均を1データとして30回行った。コアサンプルは深さ方向に3段階（上・中・下）で採取した。

4.2 試験結果及び考察

(1) 重錘落下試験とベーンせん断試験の適用範囲

コーン指数は、全試験範囲で土の固さの判定が可能であった。これに対し、重錘落下試験は、コーン指数が大きくなる含水比の低い範囲では地盤反力係数が得られたが、コーン指数が小さくなる含水比の高い範囲では、地盤の軟質化に伴い、地盤反力係数が得られなかった。（図-4）

逆にベーンせん断試験は、コーン指数が小さくなる含水比の高い範囲ではせん断強さが得られたが、コーン指数が大きくなる含水比の低い範囲では、ベーンせん断試験機器の上限値を超え、計測値を得られなかった。（図-4）

(2) トラフィカビリティとの関係

湿地ブルドーザが走行可能なトラフィカビリティをコーン指数350kN/m²程度として、コーン指数が得られる含水比状態（図-5の山砂の15~20%付近、図-6のロームの55%付近）を見ると、重錘落下の地盤反力係数が得られている。そのため、湿地ブルドーザのトラフィカビリティを満足するには、重錘落下の地盤反力係数が得られる強度以上が必要である。

一方、ベーンせん断強さは、含水比が高く、コーン指数が小さな範囲で計測が可能だったものの、湿地ブルドーザのトラフィカビリティの地盤強度範囲内に至らなかった。

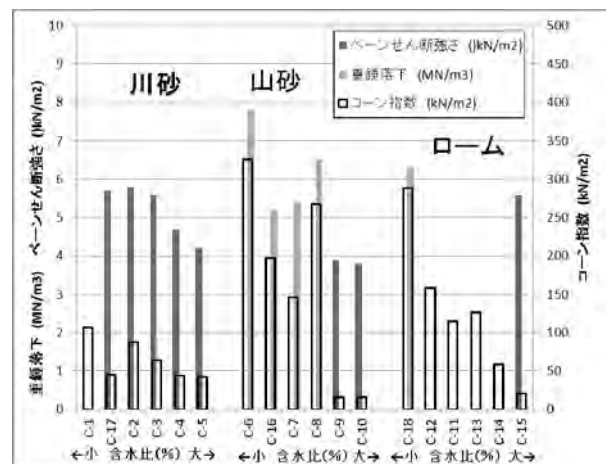


図-4 川砂、山砂、ロームの計測データ

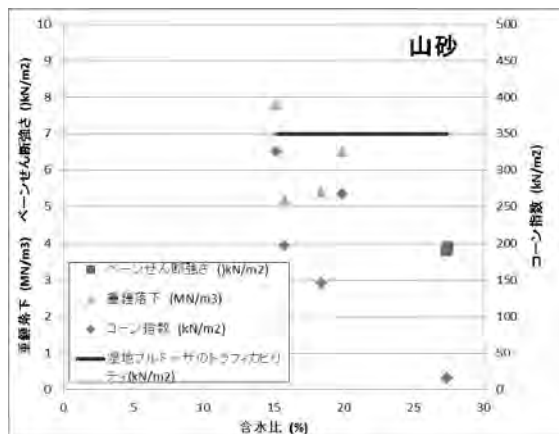


図-5 含水比とコーン指数等（山砂）

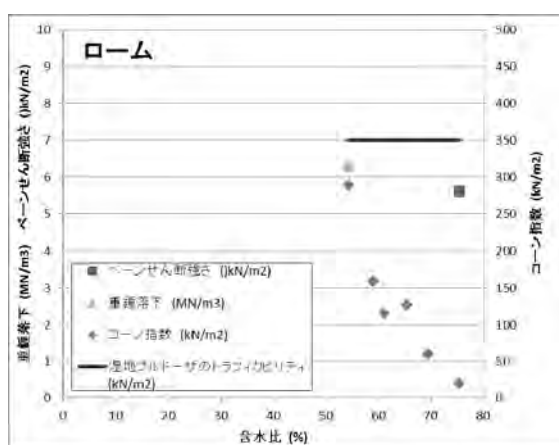


図-6 含水比とコーン指数等（ローム）

(3) コーン指数との相関性

コーン指数と重錘落下の地盤反力係数については強い相関があった（図-7）。但し、トラフィカビリティを評価するには、違う材質に変えて試験を行うなど更なるデータの拡充が必要である。

一方、コーン指数とベーンせん断強さについては弱い相関があった（図-8）。今回地盤が軟質な場合の適用範囲がわかったため、湿地ブルドーザのトラフィカビリティに近い、より硬質な場合のデータを収集する必要がある。

(4) 今後の課題

重錘落下試験は、軟弱地盤のために重錘が地盤に相当沈み込んだことから、例えば重錘の重さを軽量化するなどの改良により、適用範囲を広げることができると思われる。重錘を地盤に落とすだけという簡単な計測方法なので、継続して軟弱地盤の評価を行いたい。

ベーンせん断試験では、強度の上限値から、湿地ブルドーザのトラフィカビリティ付近の強度特性は調査できなかった。しかし、ベーンを深く貫入させることで深度方向の地盤強度の変化が調査

できることから、ベーンの羽を小型化するなどして抵抗力を下げ、湿地ブルドーザのトラフィカビリティでの地盤で調査が可能になるような改良を行い、計測したい。

なお、今回の試験では、ベーンせん断試験の実施深さを10cmに固定したが、複数深さで実施することで、深さ方向に含水比が変化することで強度の変化あったコーン指数の結果と併せ、ベーンせん断強さの相関がわかるものと考えられる。

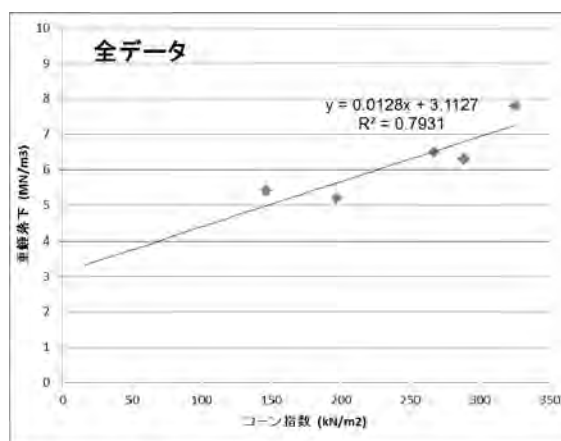


図-7 コーン指数と重錘落下

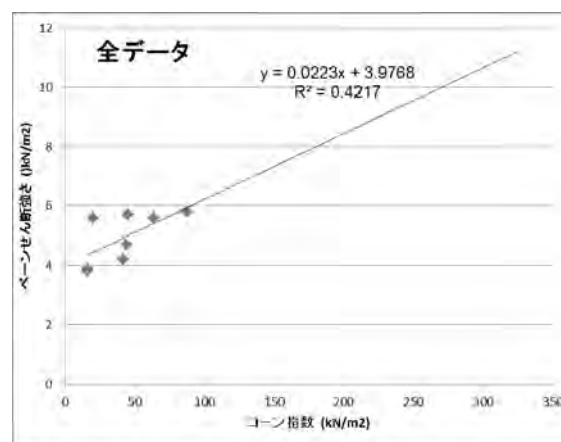


図-8 コーン指数とベーンせん断強さ

謝辞

本研究開発の実施にあたり、ご指導・ご助言を賜っておりますSIP、NEDOをはじめ関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」各研究開発課題の概要 (<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-53.pdf>)