

鋤式海底ケーブル敷設機械の掘削刃形状が曳航船の牽引力に与える影響

大成建設㈱

正会員 ○松井 秀岳

University of Dundee 非会員 M.J. Brown, S. Robinson, A.J. Brennan

1. はじめに

洋上風力発電は、化石燃料を使用したこれまでの発電方法に変わる再生可能エネルギーのひとつとして世界的に導入が進められている。洋上から陸上への送電を担う海底ケーブルは、底引き網などの漁業活動や船舶の係留作業によって損傷する事例が報告されており、これらを回避する目的で海底下数メートルの地盤中に埋設される。埋設には Cable plough (plough: 鋤) と呼ばれる掘削刃を持った敷設機械が用いられ、曳航船で牽引することで海底にトレンチが造成され、同時にケーブルが埋設される。曳航に必要な牽引力は、曳航船の仕様選定や工程管理において重要な予測・評価項目であるが、現行設計で用いられる経験的な予測式(1)¹⁾は、機械・地盤等の施工条件に関連したパラメータの考慮が限定的で、包括的な補正係数に依存している。

$$F_{cable} = F_w + C_s \gamma D^2 + C_d v (C_s \gamma D^2) \quad (1)$$

ここで、 F_w は機械自重と摩擦係数で決まる抵抗力、 γ は土の単位体積重量、 D はトレンチ深さ、 v は Cable plough の速度、 C_s 、 C_d は静的・動的な抵抗力の補正係数である。

上式は汎用性・精度に向上余地を多く残すとして、英国 Dundee 大学では小型模型を用いた遠心実験・重力場実験を実施し、Cable plough の挙動把握と現行予測式の改良を試みている(例えば2)。

本論文では、実務で用いられている Cable plough の掘削刃形状が多岐にわたることに着目し、その先端角度が牽引力に与える影響を、小型模型を用いた重力場実験で調査した結果について報告する。

2. 牽引力計測実験概要

(1) Cable plough の小型模型

実寸法の Cable plough を参照し、1/50 スケールのアルミ製小型模型を作成した(図1左)。同模型は掘削刃の着脱が可能になっており、先端角度が異なる3種類の掘削刃(図1右)を取り付けて実験に供した。

(2) 実験装置・実験条件

実験装置の概念図を図2に示す。小型模型の移動にともなって発生する牽引力が安定するのに十分な距離を確保するため、長さ2.4mの土槽を用いた。小型模型はワイヤーを介して土槽壁面上のレールを走行する台車に接続し、モーターで台車を5mm/secの速さで移動させることで小型模型を牽引した。牽引力はワイヤー端部に接続した荷重計で、水平方向の移動距離は土槽端部に設置した巻込型変位計で、模型挙動は接触型変位計および加速度計でそれぞれ計測した。実験では、3種類の掘削刃(前傾: Forward, 鉛直: Vertical, 後傾: Backward)について、地盤の相対密度2種類(20%, 70%)、目標トレンチ深さ3種類(10mm, 30mm, 50mm)の条件で牽引力を計測した(全18ケース、表1)。なお、今回の実験では全てのケースで乾燥砂を使用したため、水キーワード 海底ケーブル, 牽引力, 洋上風力, 模型実験, 施工機械

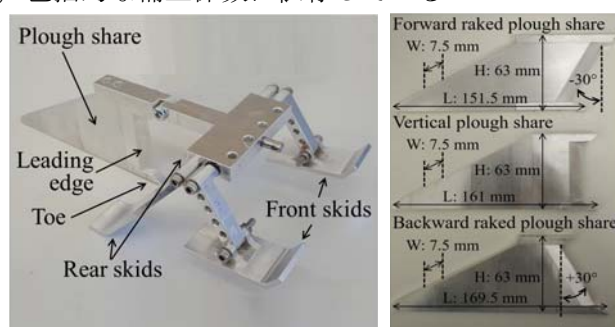


図1 Cable plough の小型模型 (1/50 寸法)

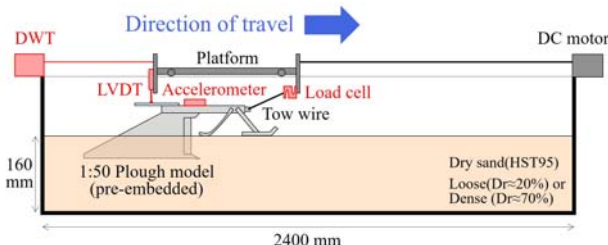


図2 実験装置概念図 (模型は拡大して描写)

表1 実験条件一覧

	地盤相対密度(%)	トレンチ深さ(mm)	掘削刃の先端角度(deg.)
実験条件	20	10	Forward: -30
	70	30	Vertical: 0
		50	Backward: 30

連絡先

〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 技術センター TEL 045-814-7217 FAX 045-814-7258

圧に起因する速度依存の抵抗(式(1)第三項)は無視できる。

実験では、英国 Cheshire 産の HST95 という均一な粒径を持つ砂を使用した(表 2)。

3. 実験結果と考察

計測結果の一例を図 3に示す。牽引力は牽引開始後すぐに上昇し、その後は概ね一定値で推移した。結果の整理にあたっては、牽引力が一定値で推移した範囲の単純平均値を各ケースの牽引力として、掘削刃形状の影響を考察した。

図 4に実験から得られた牽引力とトレンチ深さの関係を示す。いずれの掘削刃においても、トレンチ深さの増加にともなって牽引力が増加する傾向が見られた。同図中には、実験結果から最小 2 乗法で特定した補正係数 C_s を用いて式(1)の形式で表現した傾向線を併記した。トレンチ深さ D に対する牽引力の実測傾向に対して、予測式(1)の形式はよく調和している。一方で、掘削刃の形状ごとに相対密度 20%および 70%の結果を比較すると、理想的には同一になるべき補正係数 C_s の値に優位な差が見られる。現行の予測式では地盤条件に関するパラメータとして単位体積重量が組み込まれているが、相対密度の影響を十分考慮するにはいたっておらず、改善の余地があるといえる。

最後に、掘削刃の先端角度が牽引力に与える影響を考察する。いずれの相対密度においても、特定の深さに対する牽引力の大小関係は前傾(Forward) > 鉛直(Vertical) > 後傾(Backward)の順になった。この結果は、擁壁に作用する受働土圧の計算に見られるように、先端角度の変化に応じて、影響を受ける掘削刃前方の土塊の大きさが変化したことによるものと推察される。また、先端角度の変化による牽引力への影響は、相対密度 20%の場合に顕著になっており、特に相対密度 20%の前傾ケースで大きな牽引力が計測された。これらの理由は今回の実験・観察事実から特定できていないが、牽引力低減という観点では、掘削刃の先端を後傾させることが効果的である可能性が示された。

4. まとめ

模型実験で計測された牽引力は、掘削刃の先端角度によって変化しており、現行予測式を改善する余地とその方向性が示された。また、掘削刃の先端を後傾させることで牽引力を低減できる可能性が示された。

参考文献

- 1) Cathie, D. (2001). Advances in burial assessment and performance prediction, Int. Cable Protection Committee Plenary Meeting, Tokyo, Japan.
- 2) Robinson, S., Brown, M.J., Brennan, A.J., Cortis, M., Augarde, C.E. and Coombs, W.M. (2017). Improvement of seabed cable plough tow force prediction models, Proc. 8th Int. conf., Offshore Site Investigation and Geotechnics, Society for Underwater Technology, London, U.K., 914-921.

表 2 使用した砂(HST95)の物性値一覧

物性値	
最大乾燥密度 $\rho_{\max}$ (kN/m ³)	17.58
最小乾燥密度 $\rho_{\min}$ (kN/m ³)	14.59
平均粒径 D_{50} (mm)	0.14
内部摩擦角 ϕ'_{crit} (deg.)	32*
地盤-アルミ間の摩擦角 δ'_{crit} (deg.)	18*

*拘束圧 0.2~70kN/m² で計測された平均値。

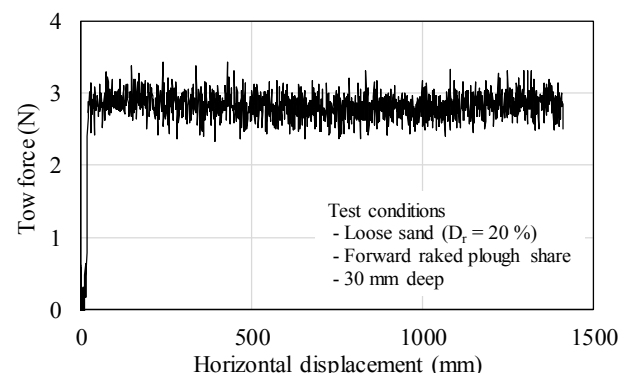
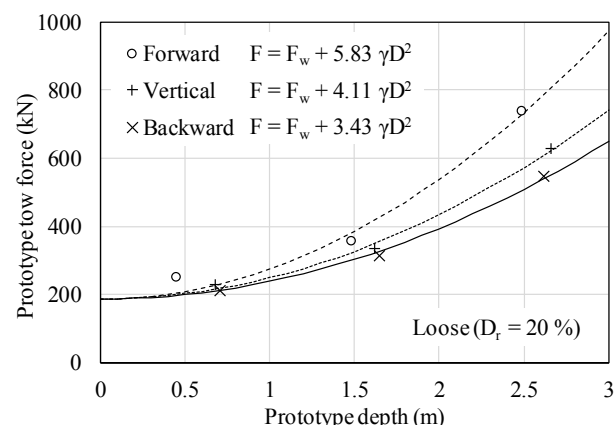
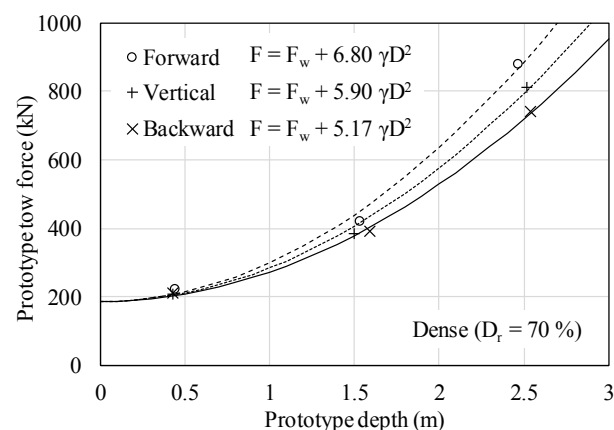


図 3 計測結果の一例(相対密度 20%, 掘削刃の先端角度-30 度, トレンチ深さ 30mm)



(a) 相対密度 20%の場合



(b) 相対密度 70%の場合

図 4 掘削刃ごとのトレンチ深さと牽引力の関係(いずれも実スケール換算値)