

28. 道路施工機械の燃費低減の検討

－ スリップフォーム工法での燃費低減 －

大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社
大成ロテック株式会社

○ 田中 純
越村 聡介
三嶋 遼太

1. はじめに

近年、建設業界における舗装技術への要求事項は多種多様化している。特に、環境負荷低減技術への関心は高く、我国においても2020年度までにCO₂排出量を2005年度比で3.8%削減する目標を掲げており¹⁾、建設機械のCO₂排出量削減を目的とした環境負荷低減への取組みがなされている。

大成ロテック(株)では、施工機械の環境負荷低減を目的として、燃料消費量が比較的多いスリップフォームペーパーバでの燃費低減を可能とするシステムの検討を実施し、従来施工同様の品質を確保しながら燃料消費量を削減する施工システムを開発した。

本稿では、開発した『稼動状況監視システム』の概要を示すと共に、施工現場への導入事例、及び導入効果について報告する。

2. 燃費低減を可能にするシステムの検討

2.1 スリップフォームペーパーバの概要

対象機として選定した機械は、米国ゴメコ社製のスリップフォームペーパーバ『コマンダーⅢ』である。スリップフォームペーパーバは、①コンクリートの供給・②敷き均し・③締固め・④成型・⑤表面仕上げの機能を備え、コンクリート版やコンクリート構造物を連続的に打設する機械である。

使用機械の主要諸元を表-1に示す。

表-1 スリップフォームペーパーバ主要諸元

機械名称		コマンダーⅢ ニュージェネレーション
エンジン型式		CAT/C7
エンジン出力		165.5(kW)/1,900(rpm)
機械重量	本体	17,500 (kg)
	モールド	5,000 (kg)
バイブレータ本数		最大 16 (本)
バイブレータ回転数		0~10,500 (rpm)
最大施工幅員		6.0 (m)

機械装置は、原動機となるディーゼルエンジン及び作業装置を稼働させる油圧装置から構成される。作業装置の大きな特徴は、締固め装置として油圧により回転する『油圧バイブレータ』を搭載していることである。

スリップフォームペーパーバを使用した施工サイクルを図-1、及び施工状況を写真-1に示す。

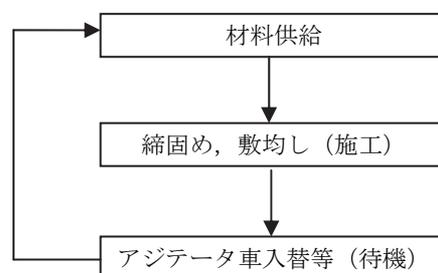


図-1 施工サイクル



写真-1 施工状況

スリップフォーム工法では、アジテータ車からコンクリートを供給する『材料供給』と、機械を走行しながら締固め、敷均しを行う『施工』及びアジテータ車の入れ替え等の『待機』の施工サイクルを繰り返し、施工を行う。

2.2 燃費低減方法の検討

燃費低減方法を検討するにあたり、前述したスリップフォーム工法の『材料供給』・『施工』・『待機』の3工程に着目し、実施工時の各作業に要する時間配分の調査を行った。調査対象とした現場での各作業における時間配分及び燃料消費量の調査結果を図-2に示す。

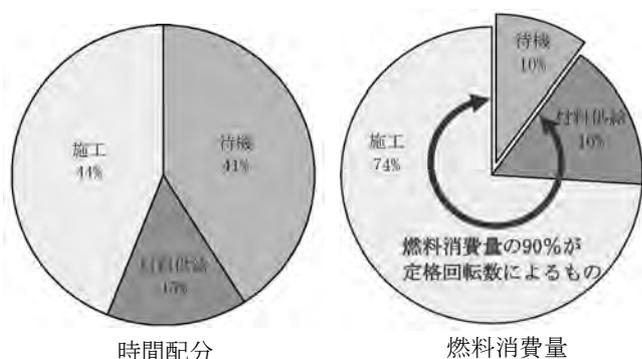


図-2 各作業の時間配分及び燃料消費量

図-2より、スリップフォームペーパーの稼働時間は、材料待ちや暖機運転などアイドリング状態である『待機』の時間が1日の41%を占めているが、エンジン回転数が低速であるため、燃料消費量の占める割合は、全体の10%程度である。それに対し、エンジン回転数を定格回転で稼働する『施工』及び『材料供給』の作業状態は、1日の稼働時間の59%であるが、燃料消費量は、全体の90%を占めていることが確認できた。

また、施工中におけるエンジン回転数及びその負荷が時間当りの燃料消費量に与える影響の調査を行った。その結果を図-3に示す。

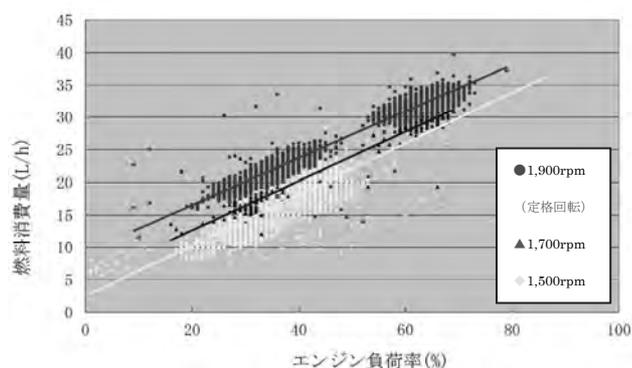


図-3 エンジン回転数による負荷と燃料消費量の関係

図-3より燃料消費量は、同一負荷条件においてエンジン回転数と比例して増加し、同一回転数では、エンジン負荷率と比例して増加することが確認できた。

2.3 検討結果

2.2での検討の結果、燃料消費量の90%を占める『材料供給』・『施工』の工程に着目し、同工程において、施工品質に影響を与えることなく、必要最小限のエンジン回転数を確保することで燃料消費量を大きく削減可能であると判断した。そこで、施工機械の稼働状況を監視し、必要最小限のエンジン回転数で施工する『低燃費運転』を可能とする『稼働状況監視システム』の開発を実施した。

3. 稼働状況監視システムの開発

3.1 開発コンセプト

下記2点を目標とし、システムの開発を行った。

- ① 施工能力低下の回避
低燃費運転時においても、走行装置、各シリンダ、材料供給装置等の作業装置は、従来の施工状況と同等の能力を発揮する事
- ② 施工品質への影響の排除
施工条件及びコンクリート性状に適したバイブレータ回転数に必要な作動油量を確保する事
(エンジン回転数を低下させた低燃費運転を実施した場合、油圧ポンプからの作動油吐出量が減少する。対象機の締固め装置は、油圧バイブレータを使用しているため、回転に必要な作動油量が確保できず、回転不足となり、コンクリートの締固め不足が懸念される。)

3.2 システム概要

3.2.1 システムの特徴

前述した開発コンセプトを基に、『稼働状況監視システム』の試作機を開発した。システムの特徴を以下に示す。また、システム構成図を図-4に示す。

- ① 燃料消費量，エンジン負荷率
エンジン ECU より CAN 通信モニタリング装置を介して、エンジン負荷率、燃料消費量のデータを PC へ出力表示する。
- ② エンジン回転数
オルターネータからのパルス出力を取得し、エンジン回転数として入力する。
- ③ バイブレータ回転数
油圧バイブレータの回転数を各バイブレータに取り付けたセンサーからの出力信号によりリアルタイムに測定表示する。
- ④ 走行速度，走行距離
走行装置に取り付けたロータリーエンコーダからの出力により走行速度、施工距離を計算する。

- ⑤ 操作スイッチによる作業状態の判別
ログデータ解析時に、『施工』・『待機』・『材料供給』の作業状態を判別する為、各操作スイッチからの信号を取得する。
- ⑥ データログ装置
上記①～⑤の信号を記録、計算し画面に表示及びデータを保存する。

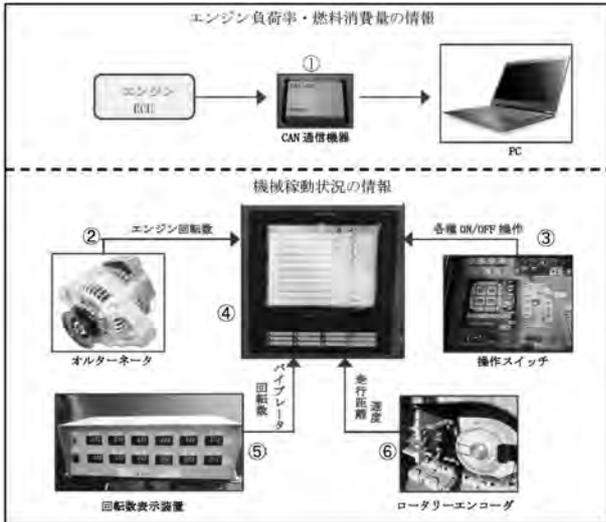


図-4 システム構成図

3.2.2 システム概念

稼働状況監視システムでは、3.2.1 に記した装置の機械情報をもとに稼働状況を監視する。その監視項目を下記に示す

① エンジン負荷率

エンジン ECU より CAN データによりエンジンの負荷率を取得する。

負荷率が 100%を超えるとエンジンが停止してしまうため、施工中は、90%以下のエンジン負荷率を保つように監視する。(連続施工中のエンジン負荷率の増減は、5%程度であるため、施工中のエンジン停止を回避する為、上限 90%と設定した。)

② バイブレータ油圧使用率 (C)

低燃費運転を実施することで、重要な点は、油圧バイブレータの油量の確保である。

当該機は、油圧バイブレータを最大 16 本装備可能で、2 系統の定量ポンプから作動油が供給される。従って、各系統の定量ポンプで、8 本のバイブレータの稼働に必要な吐出量を確保する必要がある、(1)式を満たすことが必須条件となる。

$$Q_p > \sum (Q_{pv}) \dots \dots (1)$$

$$Q_p = \frac{(q \cdot N \cdot \eta_v)}{1000}$$

- Qp : ポンプ吐出量 (L/min)
- q : ポンプ押しわけ容量 (cm³/rev)
- N : 回転数 (min⁻¹)
- ηv : ポンプ容積効率

$$Q_{pv} = q_v \cdot V_m$$

- Q_{pv} : バイブレータの作動油所要量
- Q_v : 油圧モータ押しわけ容量 (cm³/rev)
- V_m : バイブレータ回転数 (min⁻¹)

バイブレータ油圧使用率 (C) を、それぞれの油圧ポンプに対して 90%以下に保つように監視する。(連続施工中の油圧バイブレータ回転数調整範囲に柔軟に対応する為、油圧使用率を 90%と設定した。)

$$C = \frac{\sum(Q_{pv})}{Q_p} < 0.9$$

3.3 導入事例

『稼働状況監視システム』を東北管内のトンネル舗装現場に導入し、その効果の検証を行った。当該工事は、施工延長 L:953m、幅員 W:8.39m の連続鉄筋コンクリート舗装工事である。工事概要及び施工状況写真を表-2、写真-2、3 に示す。

表-2 工事概要

施工期間	平成 25 年 8 月～平成 26 年 3 月
施工場所	東北管内
工種	連続鉄筋コンクリート舗装 (トンネル内)
施工幅員	① 4.095(m) ② 4.295(m)
施工延長	953 (m)
施工厚	25 (cm)



写真-2 各装置配置状況



写真-3 施工状況

3.4 導入結果

『稼働状況監視システム』の導入効果として、以下に示す4項目について検証した。

- ① エンジン回転数
- ② 燃料消費量
- ③ 施工品質への影響
- ④ 作業環境の改善効果

3.4.1 エンジン回転数

当該工事においては、施工幅員が4.2mとなり、油圧バイブレータを合計10本使用する仕様で機械セットを行った。従来の『施工』・『材料供給』は、定格回転数の1,900rpmで施工を実施しているが、今回、エンジン回転数を低下させた低燃費施工を実施するにあたり、以下の要領により、材料供給時、施工時のエンジン回転数の初期値を決定した。油圧ポンプ1系統及び2系統で使用するバイブレータの配置及び初期設定回転数を表-3に示す。(バイブレータの初期設定回転数は、メーカーの推奨値を採用)

表-3 油圧バイブレータ使用状況

【油圧ポンプ1系統】

番号	使用条件	回転数 min ⁻¹
1	油圧バイブレータ	7,000
2	油圧バイブレータ	7,000
3	油圧バイブレータ	7,000
4	油圧バイブレータ	7,000
5	油圧バイブレータ	7,000
6	タンパ	10,500
7	未使用	0
8	未使用	0

【油圧ポンプ2系統】

番号	使用条件	回転数 min ⁻¹
9	油圧バイブレータ	7,000
10	油圧バイブレータ	7,000
11	油圧バイブレータ	7,000
12	油圧バイブレータ	7,000
13	油圧バイブレータ	7,000
14	タンパ	10,500
15	未使用	0
16	未使用	0

表-3の条件において、油圧バイブレータを稼働させる必要作動油量 Q_{pv} は、

【油圧バイブレータ使用時の油量計算】

$$\begin{aligned} \Sigma(Q_{pv}) &= \Sigma(qv \cdot Vm) \\ &= (1.48(\text{cm}^3/\text{rev}) \cdot 7,000(\text{rev}) \cdot 5 \text{本}) / 1,000 \\ &= 51.8(\text{L}/\text{min}) \end{aligned}$$

また、タンパ使用の際は、最大油量を必要とする為、バイブレータの回転数に換算し10,500(rpm)とし、

【タンパ使用時の油量計算】

$$\begin{aligned} Q_{pvt} &= (1.48(\text{cm}^3/\text{rev}) \cdot 10,500(\text{rev})) / 1000 \\ &= 15.54(\text{L}/\text{min}) \end{aligned}$$

【バイブレータ1系統の合計】

$$\Sigma(Q_{pv} + Q_{pvt}) = 67.34(\text{L}/\text{min})$$

バイブレータ油圧使用率 $C < 90\%$ より必要な油圧ポンプからの最低吐出量 Q_p は、 $Q_p = 67.34(\text{L}/\text{min}) / 0.9$
 $Q_p = 74.82(\text{L}/\text{min})$ となる。

エンジンと同回転数で駆動する油圧バイブレータ用定量油圧ポンプの必要回転数は、

$$Q_p = (q \cdot N \cdot \eta v) / 1000 \quad \text{より}$$

$$N = 1,396 \quad (\text{rpm})$$

よって、今回の施工初期条件における材料供給時、施工時の必要最小限のエンジン回転数は、1,396rpmと算出した。しかし、算出したエンジン回転数では、施工開始時の機械の挙動が不安定になるため、機械の挙動が安定する1,500rpmに修正した。また、それ以外の『待機』時においては、アイドリング状態の900rpmとした。

3.4.2 燃料消費量

燃料消費量の削減効果を検証する為、低燃費施工と従来施工(定格回転数1,900rpmでの施工)時の燃料消費量の比較を行った。

燃料消費量の算出は、低燃費施工では、エンジンECUから取得した燃料消費量のログデータの総和から算出し、従来施工では、エンジン回転数を定格として、負荷条件を同一と仮定した場合の燃料消費量を図-3より算出した。

燃料消費量を比較した結果を図-5に示す。

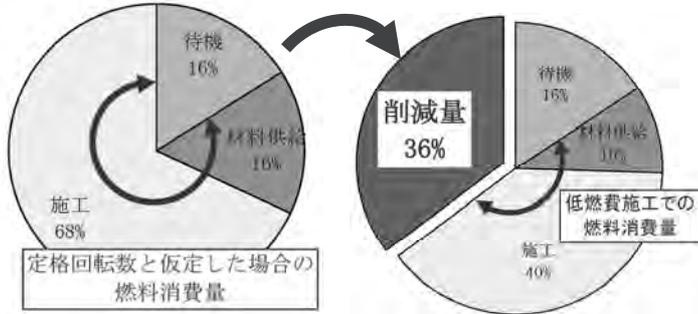


図-5 燃料消費量削減量

定格回転数における燃料消費量を100%とした場合、『材料供給』と『施工』工程のエンジン回転数を1,500rpmに設定することで、従来施工と比較して36%の燃料消費量削減結果が得られた。

3.4.3 施工品質への影響

施工品質への影響は、エンジン回転数を低下させることで、走行及び高さの制御系統への影響が懸念された。そこで、走行及び高さ制御に関して、制御の追従性の検証を実施した。

走行制御に関しては、施工状態での指示圧力及び目視での走行制御追従性の確認を実施し、ハンチング等発生することなく、安定した走行制御の追従性が確認できた。

高さ及びステアリング制御の追従性は、シリンダチャージ圧力の指示値及び、目視での制御追従性の確認を実施した。チャージ圧力の設定値は、13.7MPaである。施工時の各種シリンダ作動時に発生するチャージ圧の降下は無く、安定した圧力の確保が確認できた。また、当該施工では、情報化施工を適用して機械制御を実施していたので、制御の追従性に関しては、3DMC用モニターにて、設計値に対してmm単位で制御しており、安定した制御が確認できた。

3.4.4 作業環境の改善効果

作業環境の改善効果を検証するため、普通騒音計を用い、低燃費施工及び従来施工における各作業場所の騒音測定を実施した。図-6に測定位置、表-4に測定結果を示す。

従来施工と比較し、運転席付近で7dB、仕上げ作業付近で3dBの騒音低減効果が得られた。当該現場のようなトンネル内施工では、施工機械のエ

ンジン音が障害となり、オペレータや作業員間の連絡・指示伝達が困難な状況が多いが、低燃費施工を実施することで、エンジンから発生する騒音を低減することができ、作業効率や安全性が向上すると考えられる。

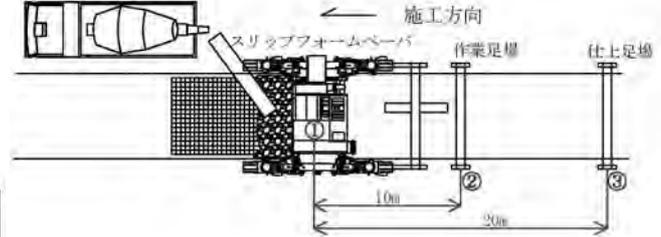


図-6 騒音測定位置

表-4 騒音測定結果

測定場所	低減量
① 運転席	7.3dB
② 作業足場	4.3dB
③ 仕上足場	3.0dB

3.5 システムの改良

3.5.1 新システムの特徴

試作したシステムを用いて、スリップフォームペーパーにおける低燃費施工を実施することでシステムの有効性が確認できた。しかし、それぞれ独立した測定機器を組み合わせたシステムであったため、現場運用にあたっては、システムを統合し、簡素化することが課題として残った。そこで、現場運用に即した見直しを実施した新システムを導入した。

『新稼働状況監視システム』のシステム構成図を図-7に示す。

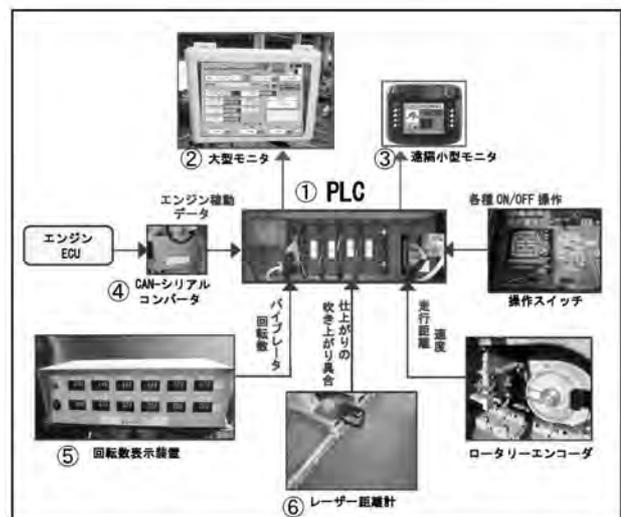


図-7 新システム構成図

新システムの特徴は、システムを簡素化するために各種データ収集に用いた測定機器からの信号をアナログ信号及びシリアル信号に変換し、PLCに取り込み一括管理する形式を採用した点である。主な装置を以下に示す。

- ① PLC 本体
各種計測機器からデータを入力し、演算機能を使用して稼働状況を監視する。また、所定の設定値から外れると警報を発する機能を装備する。
- ② 大型モニタ
オペレータが操作する運転席付近に配置し、各種設定及び稼働状況を表示する。
- ③ 遠隔小型モニタ
スリップフォームペーバのモールド付近に配置し、各種設定及び稼働状況を表示する。
- ④ CAN-シリアルコンバータ
ECU から出力されるエンジン稼働データをCAN→シリアルに変換し、PLCへ出力する。
- ⑤ バイブレータ回転計
油圧バイブレータの回転数を計測し、0-10,000rpmを0-1Vの出力値に変換する。
- ⑥ レーザー距離計
モールド後端から成型されるコンクリートの吹き上がり量を測定し、測定値をモニタで監視する。

4. まとめ

本検討では、『稼働状況監視システム』をスリップフォームペーバに導入し、その効果の検証を実施した。

その結果を以下にまとめて示す。

- ① 施工時のエンジン回転数を定格回転数から1,500rpmに下げた低燃費運転を実施することで、燃料消費量36%の削減が図れ、環境負荷低減効果が確認できた。
- ② エンジン回転数を下げたことによる機械トラブルや施工不良等がなく、従来施工同様の良好な施工結果が得られた。
- ③ 従来施工方法と比較し、低燃費施工を実施した場合、エンジンからの騒音が抑制され、騒音低減効果が確認できた。また、エンジン騒音低減効果として、作業員の意思の伝達が円滑となり、作業環境が改善され、安全性の向上が確認できた。

5. 今後の課題

今回、対象機としたスリップフォームペーバの低燃費運転におけるエンジン回転数設定の基準は、バイブレータで使用する作動油量に依存する。

当検討におけるトンネル内の半断面スリップフォーム工法では、施工幅員が機械の最大スペックに対し狭く、バイブレータの使用本数を制限（今回の条件では16本中10本使用）して施工することが可能であった為、油圧ポンプからの作動油吐出量を低減させても品質に問題なく稼働させることができた。

しかし、広い施工幅員の際は、バイブレータを全本数使用することが必要となり、エンジン回転数を低減させることが困難な状況も想定できる。今後は、様々な施工条件における環境負荷低減を実現させるためにも、同システムを使用した施工データの蓄積が必要である。

また、新システムで採用したPLCのデータ収集機能を活用して、さらに付加価値を付けた施工方法の検討、及び更なる環境負荷低減及び施工品質の向上、安全性の向上を検討していく必要がある。

6. おわりに

建設業界においては、今後も、環境負荷低減に関わる機械・材料・施工方法の開発は必須となり、使命であると考えます。

今後も、施工業者の立場として、環境負荷低減に対し、積極的に取り組み、導入を検討していく所存である。

参考文献

- 1) 環境省：平成26年度環境白書