

(論文)

ワイヤロープの動的シミュレーション技術

Wire Rope Dynamic Simulation



今西悦二郎*(工博)
Dr. Etsujiro Imanishi



南條孝夫*
Takao Nanjo



小林隆博**
Takahiro Kobayashi

Dynamic simulation of wire rope behavior involving both winch drum contact phenomena and hydraulic winch dynamics was undertaken using a finite element method. Rapid winch operation often results in uneven rope winding, and messy tangles, which can adversely affect wire rope quality. Dynamic simulation is therefore required for the design of a hydraulic winch system that overcomes these problems. Simulation results show that some lever operation can cause the rope to loosen and lead to intense pressure fluctuations. A slow-stop winch system was developed on the basis of these investigations and improved system performance was verified by the simulation.

まえがき = クレーンのウインチ作業において、つり荷を巻上げる際に、急操作にてウインチを停止させるとウインチは瞬時に停止するがワイヤロープ（以下、ロープ）は慣性力によって急に止まらず、ウインチ部においてロープの緩みが生じ、整列巻きが乱れる乱巻きが発生する。乱巻きが発生した状態にてウインチ操作を行うとロープに損傷を与え、ロープ寿命が著しく低下する。そのため、設計段階においてウインチ巻取時のロープ挙動を把握することは、品質上重要な課題となる。

ウインチ巻取時のロープの動的挙動を把握するためには、ロープとウインチドラム（以下、ドラム）との接触を考慮する必要がある。また、ウインチは油圧によって駆動されており、油圧システムの動特性を考慮した解析が必要になる。従来、ロープの動的挙動を解析した研究^{1)~3)}は行われているが、油圧システムとの連成を考慮した解析は見当たらない。一方、(株)神戸製鋼所では有限要素法をベースとした非線形動的解析コード⁴⁾を開発し、油圧システムを含む機械システムの動的シミュレ

ーションを実施⁵⁾してきた。

本稿では、移動式クレーンにおける油圧駆動ウインチ（以下、油圧ウインチ）において、ドラムとの接触、および油圧システムの動特性を考慮したロープの動的シミュレーション技術を開発し、油圧ウインチのシステム設計に適用したので報告する。まず、油圧ウインチ、およびロープとドラムの接触のモデル化について述べたのち、ウインチ停止時のロープの動的シミュレーションを行い、ロープ緩みの発生要因を明らかにする。さらに、ウインチ操作レバーを急操作した場合にもロープ緩みを発生させないウインチ緩停止システムを提案し、そのシステムを用いたときのロープの動的シミュレーションを行い、効果を予測する。

1. クレーンにおける油圧ウインチの特徴

写真1は、本研究で取上げた移動式クレーンである。クレーンにおける主要な作業は、図1に示すようにつり



写真1 移動式クレーン
Photo 1 Mobile crane

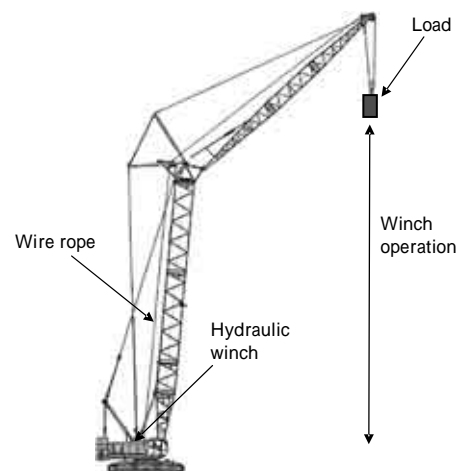


図1 ウインチ作業
Fig. 1 Winch operation

*技術開発本部 機械研究所 **コベルコクレーン(株) 開発部



写真2 ワイヤロープの整列巻き
Photo 2 Ordered winding of wire rope



写真3 急停止時のロープの緩み
Photo 3 Looseness of wire rope at rapid operation

荷の巻上げ下げを行うウインチ作業である。クレーンにおけるウインチ作業ではつり荷重が大きいため、ロープは写真2に示すように整列巻きと呼ばれる巻き方でドラムに順序よく巻取られる。通常のウインチ作業では、緩やかに巻上げ下げを開始し、緩やかに停止させるため、ロープは整列巻きの状態を維持している。ところが、巻上げ状態から急激な操作で停止させると、写真3に示すように、ロープの慣性力によってドラム上にてロープの緩みが生じ、その後整列巻きの乱れる乱巻きが生じる場合がある。乱巻きが生じると、ロープ同士に過大な力が発生し、ロープを損傷させる原因となる。そのため、設計段階にてドラム急停止時に発生するロープの動的挙動を把握することが重要となる。

2. ロープの動的シミュレーション技術

2.1 油圧ウインチのモデル化

図2は、本解析に用いた油圧ウインチシステムのモデル図である。クレーンの仕様はタワー長42.37m、ジブ長さ28.96mである。まず、ロープ部のモデル化について説明する。ロープ部をR1～R4部分に分ける。R1部はドラムに巻取られる部分であり、トラス要素を用いて50mmごとに90分割している。R2部は1mごとに38分割、R3、R4部はそれぞれ10mごとにそれぞれ3、4分割している。ジブ先端P1では、R4部の巻取量とR3への繰出量が同じになるようにして、ロープの連続性を表現する。タワー先端P2でも同様である。このモデルは2次元としており、ロープ系だけで362自由度となる。

次に、油圧駆動システムのモデル化⁵⁾について説明する。油圧駆動システムは図2に示すように、油圧ポンプによって駆動し、レバー操作量に応じて制御弁の開口面積を変化させ、ドラム軸に取付けられた油圧モータの回転数を制御する。まず配管部分は作動油の圧縮性を考慮

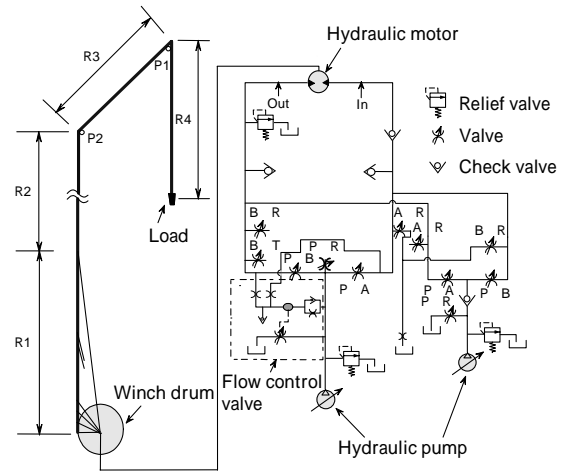


図2 油圧ウインチのモデル図
Fig. 2 Modeling of hydraulic winch system

した配管要素を用いてモデル化する。油圧モータおよびドラム部は油圧システムからロープ系へ座標が変わる部分であるが、油圧モータ部での作動油の流量の積分値 u_m とドラムの回転角 θ_d の間には $u_m = nD\theta_d$ の関係があるため、この関係式を用いて座標変換を行う。ここで、 D は油圧モータの1rad当たりの吐出体積、 n は減速比である。制御弁は巻上げ用の1速、2速を考慮しており、各スプールストロークに応じて開口面積が変化する。ここでは制御弁を、ポートごとにバルブ要素を用いてスプールストロークに応じた開口面積特性を考慮してモデル化する。バルブ要素は、各時刻での開口面積に応じてバルブの式から流量特性を算出し、運動方程式に組み込む。ポンプは、ポンプ圧によって傾転角が変化する特性を考慮に入れたポンプ要素を用いてモデル化しており、リリーフ弁およびチェック弁は断片線形減衰要素を用いてモデル化した。

2.2 ロープとドラムの接触のモデル化

ロープとドラムとの接触のモデル化を説明するために、図3に示すモデルを考える。まず、ロープはトラス要素を用いてモデル化する。トラス要素の各節点とドラム中心間に可変長トラス要素を取付ける。この要素は、節点に滑車自由度をもっており、滑車の回転によってトラス長さが変化する。滑車が自由に動けるようにしておくと、可変長トラス要素は自由に伸縮でき、ロープには

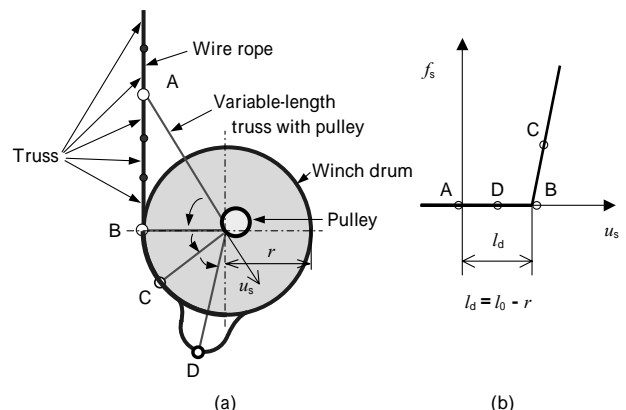


図3 ロープとドラムの接触のモデル化

Fig. 3 Modeling of contact between rope and drum

影響を与えない。ドラムが反時計方向に回転するとロープはドラムに巻取られ、節点Aは点Bに到達する。その状態から可変長トラスが短くならないように、滑車部の変位 u_s に対して図3(b)に示すような接触ばねを取付ける。ここで、 l_0 は可変長トラス要素の初期長さであり、 r はドラム半径である。可変長トラス要素が $l_d = l_0 - r$ より短くなった状態、すなわちロープがドラムと接触した状態では大きなばね反力が生じる特性をもつ。また、接触部には接触ばねに比例した減衰と質量⁶⁾を与え、過減衰となるようにしている。そのため、節点Aは点Bを通過した後は、ドラム上を運動することになる。また、点Dのようにドラムが急停止するとロープに緩みが生じるが、その場合にはロープはドラムから離れる方向に運動するため、接触ばねには反力が発生せず、接触ばねはロープの運動に影響を与えることはない。なお、ロープの緩みが発生しやすくするために、ロープとドラム間の摩擦力は無視している。

3. ウインチ急停止時のロープの動的シミュレーション

図2のモデルを用いてウインチ急停止時のロープの動的シミュレーションを行った。つり荷はロープの緩みが発生しやすい条件である無負荷（フックのみ）とした。初期条件は、レバー操作量を最大とし、ドラムを最大回転数で回転させ、つり荷を巻上げている状態とする。その状態から、ロープをドラムに1周以上巻取った後にレバー操作によってウインチを停止させる。レバー操作量は、最大値を1とし、停止状態を0とする。レバー操作は、図4に示すようにレバー操作量を1から0まで直線的に変化させ、その時間を停止時間 t_s とした。なお、時間は基準時間を用いて正規化している。そのときのドラム角速度を図5に示す。また、油圧モータの出口部の圧力を図6に示す。図5から停止時間 $t_s = 0.04$ では、ドラム部に大きな減速度が生じていることがわかる。図7(a)はロープ挙動図を示す。この図から、ロープはドラムから大きく飛出している様子がわかる。このような状況では、ドラムに巻付いていたロープがドラムから離れることになり、乱巻きが発生する可能性が極めて高くなる。なお物理量に関しては、正規化して表示している。

次に、停止時間を $t_s = 0.1$ ごとに0.4まで変化させたときの動的シミュレーションを行った。 $t_s = 0.2$ 時のロープ

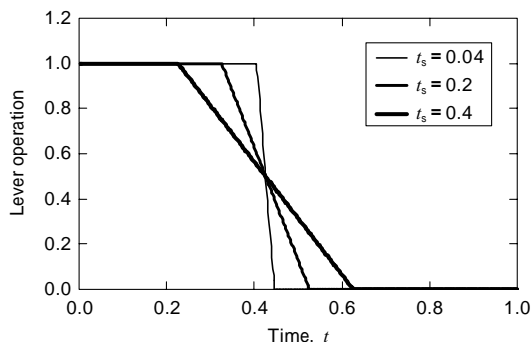


図4 ウインチシステムのレバー操作量
Fig. 4 Lever operation of winch system

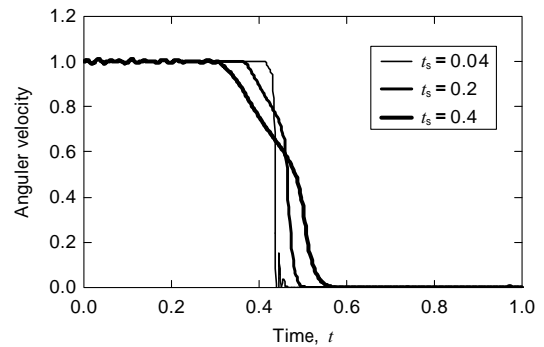


図5 ドラムの角速度変化
Fig. 5 Angular velocity change of winch drum

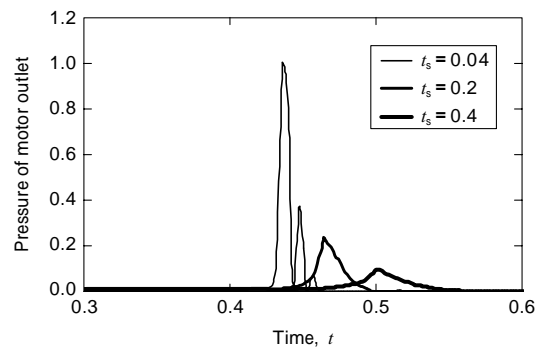


図6 油圧モータ出口部の圧力変化
Fig. 6 Pressure change of motor outlet

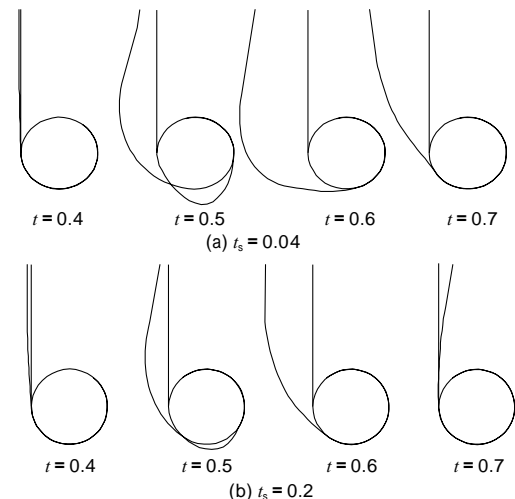


図7 ウインチ急停止時のロープ挙動
Fig. 7 Stick diagram of wire rope at winch sudden stopping

挙動を図7(b)に示す。また、ロープの飛出量の最大値を図8に示す。この図から、停止時間を長くすることによって最大飛出量は小さくなるが、直線的には変化していないことがわかる。これは、図4のようにレバー操作を一定の速度で停止させても、制御弁の開口面積特性によってドラムの角速度は図5に示すように一定の減速度を示さないためである。この減速パターンがロープの飛出量に影響を与えることになり、停止時間に対する最大飛出量も直線的に変化しなくなると考えられる。

4. 緩停止システムの性能解析

ここでは、急激なレバー操作によってウインチを停止させたときでも、ロープがドラムから飛出さないようにするために、ウインチ緩停止システムを考案し、その性

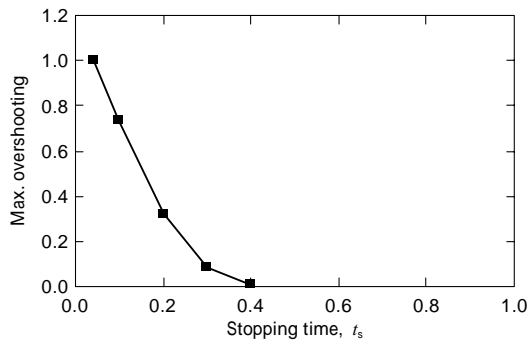


図8 ロープの最大オーバーシュート量
Fig. 8 Maximum overshooting of wire rope

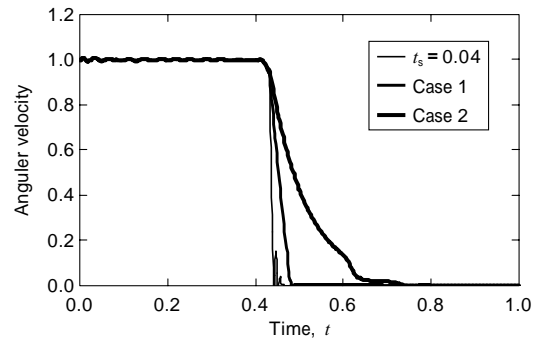


図10 緩停止システムを用いたドラムの角速度変化
Fig.10 Angular velocity change of winch drum by using slow-stopping hydraulic winch system

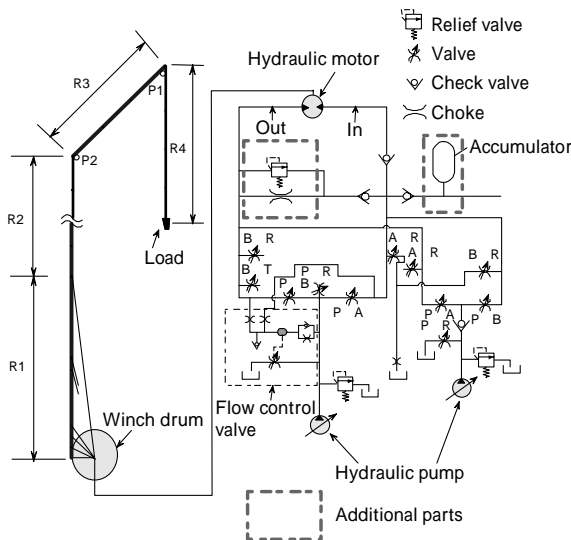


図9 緩停止システムのモデル図

Fig. 9 Mathematical model of slow-stopping hydraulic winch system

能を検討する。図9はウインチ緩停止システムのモデル図である。ウインチを駆動する油圧モータ出口部に低圧のリリーフ弁とチョーク絞りを取付けることによって、ウインチ停止時に発生するモータ出口部の圧力を低く、かつ緩やかに変化させることができる。それによってドラムに発生する減速度を緩和させ、ロープの飛出しを抑える効果が期待できる。また、油圧モータ入口部には、キャビテーション防止用にチェック弁を介してアキュムレータを取付ける。

まず、油圧モータ出口部にリリーフ弁のみを取付けた場合 (Case 1) とチョーク絞りの両方を取付けた場合 (Case 2) についてシミュレーションを実施した。そのときのドラム角速度、および油圧モータ出口部の圧力をそれぞれ図10、図11に示す。また、ロープの挙動を図12に示す。Case 1の場合には、リリーフ弁の効果によって減速度が小さくなるが、リリーフ圧よりも圧力が低下したタイミングにおいて減速度に変化が生じるため、図12に示すようにロープの飛出しが発生する。Case 2の場合には、チョーク絞りを追加した効果によって、油圧モータ出口部の圧力がランプ状に減少していくため、減速度も緩やかに変化し、かつ図12に示すようにロープの飛出しを抑えることができ、ロープの乱巻きを防止することができる。

むすび=クレーンの油圧ウインチシステムに対して、口

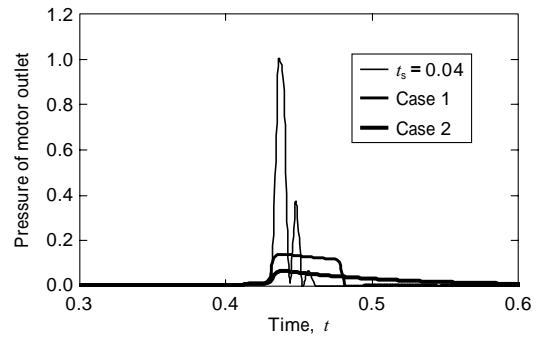


図11 緩停止システムを用いた油圧モータ出口部圧力変化
Fig.11 Pressure change of motor outlet by using slow-stopping hydraulic winch system

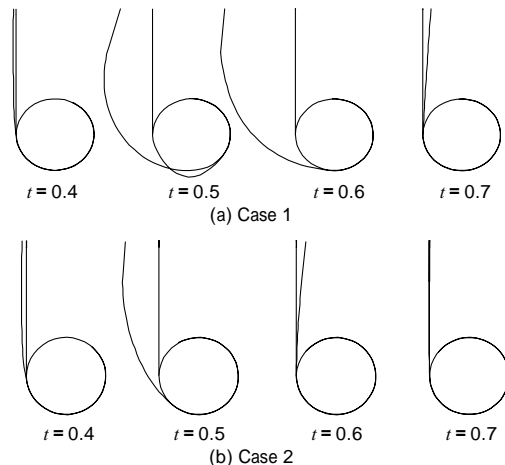


図12 緩停止システムを用いたロープ挙動

Fig.12 Stick diagram of wire rope by using slow-stopping hydraulic winch system

ロープの動的シミュレーション技術を開発し、ウインチ巻上げ停止時に発生する乱巻きの発生要因を解明し、ウインチ緩停止システムの有効性を示した。本技術はロープの長寿命化にも貢献した。

参考文献

- 1) 堀江 寿ほか: 日本機械学会講演論文集, 99-1 (1999) p.211.
- 2) Nishinari K.: Journal of Applied Mechanics, Vol.65 (1998) p.737.
- 3) Kaczmarczyk S.: Key Engineering Materials, Vols.167-168 (1999) p.281.
- 4) 藤川 猛ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.37, No.1 (1987) p.93.
- 5) 今西悦二郎ほか: 日本機械学会論文集 (C編), 53巻, 492号 (昭62) p.1711.
- 6) 今西悦二郎ほか: 日本機械学会論文集 (C編), 63巻, 608号 (1997) p.1118.