

コンクリートポンプ車 クローズ回路方式ピストンポンプの制御技術



須田 智之
Tomoyuki Suda

【概要】

2017年10月に発売されたピストン式コンクリートポンプ車PY165-39は、従来機種の油圧回路とは全く異なるクローズ回路を採用することで、 $165\text{m}^3/\text{h}$ の吐出量を実現させた。PY135-28-Hにて確立させた油圧ポンプの電気式流量制御技術を応用したクローズ回路用油圧ポンプの斜板制御を実施したが、クローズ回路特有の新たな制御技術を多数盛り込む必要があった。そこで、長センサや回転センサ等複数のセンサを採用することで、より正確な制御が可能となり、低騒音及び高効率なピストン式コンクリートポンプ車が完成した。

【ABSTRACT】

Released in October 2017, the PY165-39 piston type concrete pump truck uses a closed circuit—a design completely different from the hydraulic circuits used in previous models—to achieve a discharge rate of $165\text{m}^3/\text{h}$. Electric flow control technology for hydraulic pumps developed for the PY135-28-H made swash plate control possible for closed-circuit hydraulic pumps, but many other new control technologies specific to closed circuits were also needed. In addition, the use of multiple sensors—including length and rotation sensors, allows for more precise control, resulting in a low-noise, high-efficiency piston type concrete pump truck.

1. まえがき

2014年に発行された極東開発工業技報 Vol.2にて紹介したPY135-28-Hは、それまでの機種と比べて大幅な吐出量向上を果たした高圧大容量機種として最大吐出量 $135\text{m}^3/\text{h}$ を実現した。一方、世界に目を向けると、欧州の名だたるコンクリートポンプ（以下CP）メーカーからは最大吐出量 $160\text{m}^3/\text{h}$ クラスのCP車が数多く販売されており、2014年時点で欧州メーカーのCP車の日本市場への参入は年々増加傾向にあった。欧州製CP車に対抗すべく、更なる最大吐出量の向上が求められたが、PY135-28-H開発時に最大吐出量を $130\text{m}^3/\text{h}$ から $135\text{m}^3/\text{h}$ へと3.8%向上させるために、油圧ポンプの吐出量は約11%もの増加が必要であった。これは、油圧ポンプ吐出量の増加に伴う、回路抵抗による圧損が極端に増加したことが主要因と考えられる。即ち更なる吐出量向上のためには、作動油流量の増加だけでなく、各種バルブの大型化や油圧ホース等のサイズアップによる圧損対策も必要と考えられ、重量の増加は避けられない。元より大型のCP車は車両総重量に余裕はなく、最大吐出量 $160\text{m}^3/\text{h}$ の実現性は低かった。

欧州製CP車の吐出性能と肩を並べるべく調査を進めた結果、油圧回路方式の違いによる影響があると考えられた。欧州製CP車の油圧回路はクローズ回路方式を採用しており、極東開発工業製CP車の油圧回路（オープン回路方式）とは全く異なるものであった。

クローズ回路化については、過去にも何度も研究を重ねていたが、油圧制御による油圧ポンプの斜板コントロールが難しく、製品化には至っていなかった。

この度、欧州の大手油圧機器メーカーからのクローズ回路用油圧ポンプの購入が可能となり、PY135-28-Hで培った油圧ポンプの電気流量制御技術を応用することにより、クローズ回路方式のCP車PY165-39（写真1）を完成させた。

ここでは、クローズ回路についての解説や低騒音化、安全性向上に関する制御技術を紹介する。



写真1 PY165-39

2. クローズ回路について

2-1. オープン回路との違い

極東開発工業従来機種の油圧回路は、オープン回路方式と呼ばれるもので、オイルタンクに貯められた作動油を油圧ポンプが吸い・吐出し、切換バルブブロックを介してメインシリンダを作動させる。そして、メインシリンダから排出された作動油は、再びオイルタンクへと戻る。メイン

シリンダの伸び縮みの切り換えは切換バルブブロックによって行われる。作動油が一旦オイルタンク内に開放されることからオープン回路と呼ばれている。これに対し、クローズ回路方式とは、油圧ポンプが吐出した作動油にてメインシリンダを作動させ、メインシリンダから出た作動油を直接油圧ポンプが吸入する回路となる。このように作動油がオイルタンクに戻ることなく、閉じた回路内を循環することからクローズ回路と呼ばれている(図1)。クローズ回路は、ポンプの吐出量と吸入量が同じである必要があるため、流入量と排出量が同一となる油圧モータ駆動の回路で使用されることが一般的である。油圧シリンダ駆動の場合、流入量と排出量が異なることからクローズ回路には向いていない。しかし、CPの場合、左右2本の油圧シリンダを一対としておりロッド側、もしくはボトム側を接続することで、一方のシリンダが縮んでいる時にもう一方のシリンダが伸びるという回路構成となっている。このため、一方のシリンダに流入する作動油量ともう一方のシリンダから排出される作動油量が同一となり、クローズ回路化が可能となっている。

クローズ回路用の油圧ポンプは作動油の吐出量を制御する斜板の向きを反転させることができ、斜板の反転により吸入・吐出の方向を切り換えることができる。斜板の反転による吐出方向の切り換えによりメインシリンダの伸び縮みを切り換えることができるため、クローズ回路では切換バルブが不要となる。このことから、作動油流量の増加による切換バルブの大型化に伴う重量増がなく、クローズ回路は大流量化に適した回路であると言える。

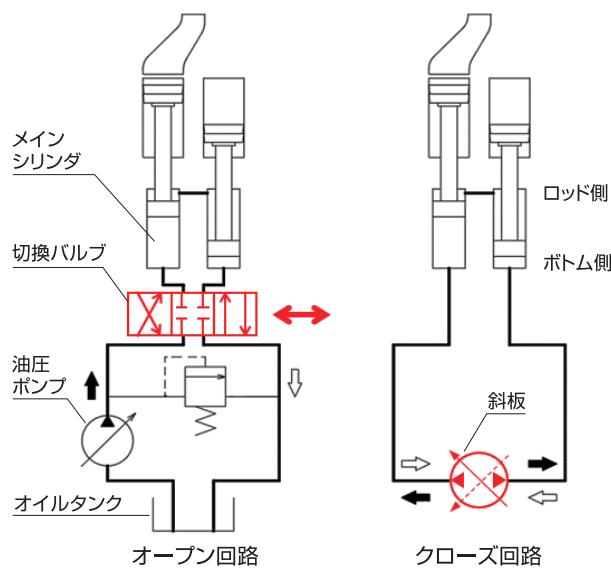


図1 回路比較

2-2. クローズ回路用油圧ポンプ

前述の通り、油圧モータ駆動用として使用されることの多いクローズ回路用油圧ポンプは、国内ではホイールローダーやショベルカーなど大型建機の走行用のHST(油圧式無段変速機)向けで使用されることが多く、それらの斜板の応答速度はあまり早くない。しかし、CPの場合、瞬時に斜板を反転させてメインシリンダのストローク方向を反転させる必要がある。そのため斜板の応答速度が非常に重要となるが、国内メーカーのクローズ回路用油圧ポンプではCP向けとして使用することはできなかった。欧州では、クローズ回路方式のCPが数多く存在するため、CP向けのクローズ回路用油圧ポンプの設定があり、斜板の応答速度は非常に速い。欧州メーカ数社に向け取引の打診を行った結果、1社より購入可能の返事があり、クローズ回路方式のCP車の実現に向け、スタートすることができた。

今回採用したクローズ回路用油圧ポンプ(図2)は、電気流量制御方式の油圧ポンプであり、指令電流を制御することで斜板の角度を制御できる油圧ポンプである。斜板の駆動にはパイロット圧と呼ばれる油圧を必要とするが、パイロット圧は、油圧ポンプに内蔵されたチャージポンプにより確保している。チャージポンプの上流には、サクションフィルタが設置され、常に清浄な作動油が油圧ポンプ内に供給されている。チャージポンプの下流には低圧リリーフバルブと呼ばれる安全弁が設置され、約3MPaのパイロット圧を常に発生させて安定した斜板制御を保証している。また、チャージポンプから吐出された作動油は、クローズ回路内にも供給されており、メインポンプの吸入側に約3MPaのチャージ圧を与え加圧している。これによりメインポンプ吸入側が負圧になって気泡を生じ機器を傷付けるキャビテーションの発生を防いでいる。

油圧ポンプは、オイルタンクからの作動油吸入を確実に行うため、最高回転数が定められている。オープン回路用油圧ポンプの場合、PY135-28-Hに採用している油圧ポンプで2000rpmが最高回転数となる。しかし、クローズ回路用油圧ポンプの場合、吸入側への加圧のおかげで、さらに高い回転数でも吸入が可能となる。PY165-39では、最高回転数を2600rpmに設定した。クローズ回路方式では、最高回転数を高められることで、油圧ポンプ自体のサイズを小さくできるというメリットもある。油圧ポンプの回転は、エンジンからトランスファPTOを介して伝えられているが、エンジンから等速で2600rpmを伝えようとすると、非常に燃費が悪くなる。そこで、トランスファPTOで增速させることで燃費の改善を図っている。

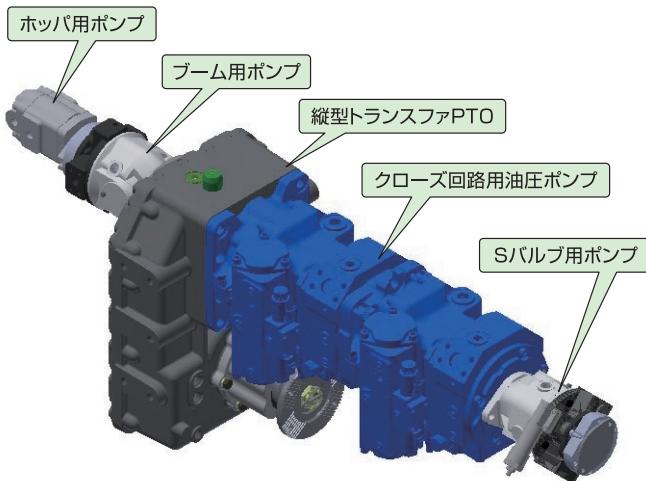


図2 クローズ回路用油圧ポンプ

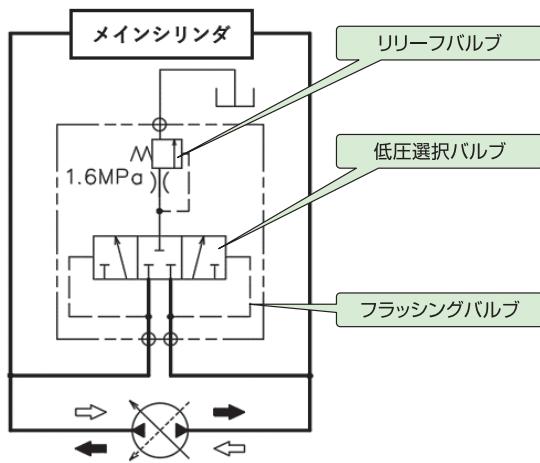


図3 フラッシングバルブの油圧回路図

2-3. フラッシングバルブ

ここまでクローズ回路は閉じた回路であると説明してきたが、完全に回路が閉じていると、閉じた回路内の作動油清浄度の悪化や作動油温の上昇という問題が生じる。そこで、クローズ回路には、フラッシングバルブが必要となる。フラッシングバルブは、クローズ回路内の作動油を一定量タンクに逃がす役割を担っている。フラッシングバルブの作用により逃がした作動油の補充は、チャージポンプより供給されている。このようにフラッシングバルブの働きにより一定量の作動油を入れ替えることで、クローズ回路内のフラッシングを行い、回路内の清浄度を保つと共に作動油の冷却を行っている。フラッシングバルブの油圧回路図を図3に示す。フラッシングバルブには、メインポンプの吐出側と吸入側の差圧により作動する低圧選択バルブが内蔵され、1.6 MPaのリリーフバルブを介して吸入側の回路がオイルタンクに接続される構造となっている。このため、メインポンプが吐出していない、すなわち斜板が中立の状態では、フラッシングは行われず、メインポンプの作動時のみ行われている。また、左右のシリンダのストロークのズレや外部負荷の急激な上昇(閉塞等)により吸入側の圧力が低下した場合には、リリーフバルブが閉じることでメインポンプの最低パイロット圧を確保してポンプの作動を保証する機構となっている。

3. ピストン位置検知

作動油流量を増加させて最大吐出量を向上させることは、すなわちメインシリンダのストローク速度の高速化を意味する。PY135-28-Hにてロッドカバー部に内蔵した近接センサでピストンのストロークエンド付近の位置検知を行い、スローストップ制御を実施したが、ストローク速度の高速化に伴い、同様の位置検知方法では制御が追い付かず無駄が多くなる可能性があった。そこで、シリンダストロークの全長に渡ってピストン位置の検出が可能な長さセンサを採用することで、より精密な制御が可能となった。

3-1. 磁歪式長さセンサ

今回採用した長さセンサ(図4)は、磁歪式と呼ばれるもので、センサロッドをピストンロッド内に設置し、ピストン部に取り付けられたマグネットの位置を全長に於いて検出できるセンサである。ストローク長1m以内のシリンダであれば、センサロッドがピストンロッド内面に接触することなく、非接触での検知が可能であるが、PY165-39のメインシリンダのストローク長は2mを超えており、センサロッドの自重によるたわみにより、ピストンロッド内面への接触が発生するため、センサロッドの摩耗対策が必要となつた。

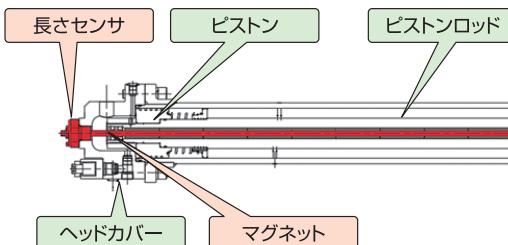
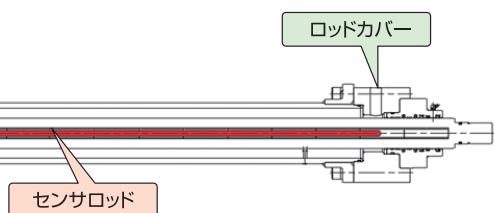


図4 長さセンサ組付図



3-2. センサロッド摩耗対策

センサロッドの周囲は作動油で満たされているため、ピストンロッド内面との接触部には十分な潤滑材が存在する。そのため、ピストンロッド内面の表面粗さが十分に高ければ摩耗はしないと考えた。そこでピストンロッド内部に内面が滑らかな冷間引き抜き材のパイプを設置し、摩耗に対する評価を実施した。しかし、この構造ではストローク回数数千回でセンサロッドの摩耗が確認され、作動油中に浸かっているとはいえ、金属同士が接触しながら摺動すると摩耗が発生することがわかった。さらに、摩耗により発生した摩耗粉(鉄粉)により摩耗が促進されることもわかった。そこで、ピストンロッド内に樹脂パイプを挿入し、樹脂とセンサロッドが接触する構造にて再評価を実施した。樹脂パイプには、耐摩耗性や耐油性、耐熱性を考慮しポリアセタール樹脂(POM)を採用した。摺動耐久試験の結果、センサロッドや樹脂パイプへの致命的な摩耗はなく、CP車の稼動寿命に対し、十分な耐摩耗性を有していることを確認できた。この結果を受け、メインシリンダへの長さセンサの採用が可能となり、精密な制御が可能となつた。

4. メインポンプ斜板制御

クローズ回路の場合、メインシリンダの作動制御は全てメインポンプの斜板制御にて行うことになる。そのため、従来のオープン回路の機種とは全く異なる制御が必要となつた。

4-1. 定馬力制御とエンスト防止

従来機種に採用されているオープン回路用メインポンプの場合、定馬力制御の機構が内蔵されており、一定馬力以上の負荷がかからない仕組みとなっている。これによりエンジンへの過負荷を防ぎ、エンストの発生を防止している。しかし、今回採用したクローズ回路用メインポンプには定馬力制御の機構が備えられていない。そのため、エンジンへの過負荷を防ぐためには、負荷に応じた斜板制御を行う必要がある。斜板の制御技術については、PY135-28-Hにて培った低回転域でのエンスト防止制御を応用し、圧力センサからの油圧情報と斜板指令電流から求めた押しのけ容積より(1)式にて軸トルクを計算し、この軸トルクが設定した上限トルクを超えないように制御した。軸トルク算出に使用する機械効率は、油圧ポンプメーカより効率データを入手し、回転数や圧力、押しのけ容積に合わせて算出している。

T : 軸トルク

P : 圧力センサからの油圧

D : 斜板指令電流から求めた押しのけ容積

η : 機械効率

また、この上限トルクを図5のように油圧ポンプ回転数により変化させ、低回転域での上限トルクを下げることで、低回転域でのエンスト防止の機能も兼ね備えた。油圧ポンプ回転数は、トランスファ PTOに設置された回転センサからパルス信号を取得し、パルス間の時間を計測することで、算出している。

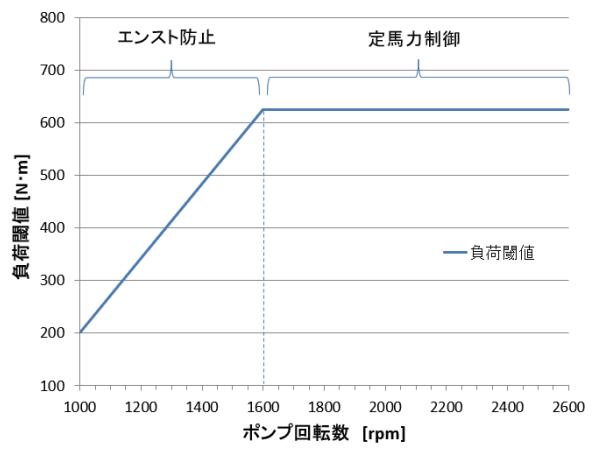


図5 トルク上限のグラフ

4-2. 吐出圧上限規制

近年の打設現場での安全に対する要求の高まりによりPY135-28-Hにて採用した吐出圧の可変機構が非常に好評であったため、PY165-39開発時にも同様機能の採用を求められた。しかし、クローズ回路用油圧ポンプには、最高圧力を規制する高圧リリーフバルブは内蔵されているものの、その設定圧は固定値であり、任意の圧力に可変させることはできなかった。また、回路が閉じているため、いわゆるリリーフバルブを追加することもできなかった。油圧ポンプに内蔵されている高圧リリーフバルブとは、実際には斜板駆動用パイロットラインに設置されたシャットオフバルブであり、作動油圧が設定圧に達すると斜板へのパイロット圧の供給を絶つことで斜板を中立に戻し、設定圧以上の圧力が発生するのを防ぐという機構である。そこで、圧力センサからの圧力情報をもとに、作動油圧が任意の設定圧を超えないようにフィードバックによるPD制御^(注1)にて斜板のコントロールを行った。制御ブロック図を図6に示す。(2)式により算出したuとユーザ指示値を比較し、小さい方の値を油圧ポンプへの指令値としている。

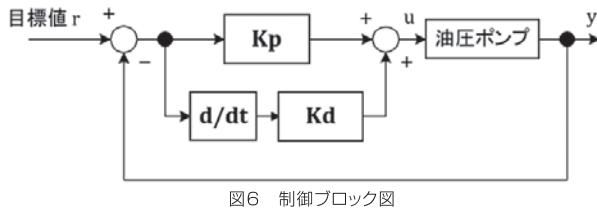


図6 制御ブロック図

(注1)PD制御(Proportional:比例、Differential:微分)

目標値との偏差に比例して指令値を決定する制御に加え、目標値との偏差を時間で微分したものに一定値を掛ける項を加えることでより安定して目標値を目指す制御

$$U = (r[k] - y[k]) \cdot K_p + \frac{(y[k] - y[k-1])}{dt} \cdot K_d \quad \dots \dots \dots (2)$$

U : 油圧ポンプへの指令値

*U>ユーザ指示ならユーザ指示通り

r : 目標圧力

y : 現在圧力

Kp : 比例ゲイン

Kd : 微分ゲイン

設定圧はPY165-39にて初めて採用したディスプレイ(図7)にて0.5MPa刻みで任意に設定できるようにした。斜板コントロールによる圧力制御は、CP車では初めての試みであったため、ゲインの調整に苦労したが、実打設による評価を繰り返し、製品レベルに仕上げることができた。これによりコンクリート配管の肉厚に応じ、吐出圧を柔軟に設定できるようになり、閉塞時のコンクリート配管の破裂防止等、安全性向上にも寄与している。



図7 ディスプレイ(上限設定画面)

4-3. 吐出量上限規制

最大吐出量の向上を目指したPY165-39であるが、CP車の使い方として、一定の吐出量でゆっくりと打設したい場合がある。これはCFT(鋼管圧入)打設と呼ばれる打設方法で、パイプ状の柱の内部に生コンを圧入していく工法である。この工法では、柱内の内圧の急激な上昇を防ぐために一定速度でゆっくりと圧入を行う必要がある。そこで、吐出圧上限規制と同様に、ディスプレイ(図7)にて設定した任意の吐出量が上限となる吐出量上限

規制の機能を追加した。吐出量上限規制の制御は、メインシリンダに内蔵した長さセンサからのピストン位置情報からピストンの速度を計算し、ピストン速度から求めた吐出量が設定された上限吐出量を超えないようにフィードバック制御により斜板をコントロールした。

4-4. 最小吐出量

オープン回路用油圧ポンプでは、最低押しのけ容積は最大押しのけ容積の約10%程度に設定されており、これ以上押しのけ容積を下げる事はできない。そのため、エンスト防止制御が導入されている機種においても、コンクリートシリンダ9B仕様では、その最低吐出量は10m³/hを超えている。しかし、写真2のようなマンションの手摺の打設等、極低吐出量での打設を求められるケースも少なくない。

クローズ回路用油圧ポンプの場合、斜板を中立にすることで、メインシリンダの作動を停止させており、実質最低押しのけ容積はゼロまで下げることができる事になる。この特性を活かし、最小吐出量も無限に下げることが可能となるが、あまりに低い吐出量では、作動しているのかどうかが判別できず、非常に使いづらい機械となってしまう。そこで、作動の判別ができる最小の吐出量として、7m³/hを最小吐出量と設定した。これにより、最大吐出量165m³/hの機械でありながら極低吐出打設も可能なCP車となり、使い勝手の良さが非常に好評であった。



写真2 極低吐出打設一例

5. 静音化

クローズ回路化により、メイン回路の切換バルブが不要となったことから、メインシリンダのストローク反転時の切換バルブの切換音はなくなり、非常にスムーズにストロークの

反転を行えるようになった。しかし、圧送負荷が増加するとSバルブ切換時に一瞬負荷が抜けることに起因するウォータハンマ音等の衝撃音が発生する。そこで、PY135-28-Hにて採用した技術を元に更なる改良を加え衝撃音の緩和を図った。

5-1. 衝撃音緩和

PY135-28-Hでは、ストローク反転後の油圧ポンプの吐出流量の増加をなだらかにすることで、ウォータハンマ音の発生を防ぐ制御を盛り込んだ。しかし、吐出量を向上させるという視点で見ると、ストローク反転後の油圧ポンプ流量の立ち上がりは、より早い方が良く、ウォータハンマ音の低減とは相反する制御が必要であった。これらを両立させるべく様々な方法を検討した。ウォータハンマ音は、急激な圧力上昇時に発生することに着目し、基本的にはできるだけ早く油圧ポンプ流量を立ち上げつつ、急激な圧力上昇の予兆があった場合のみ斜板を瞬間的に戻し、吐出量の急激な圧力上昇を防ぐ制御を追加した。これにより図8のような油圧波形となり、低負荷打設時の高吐出量と高負荷時の衝撃音緩和を両立させることができた。

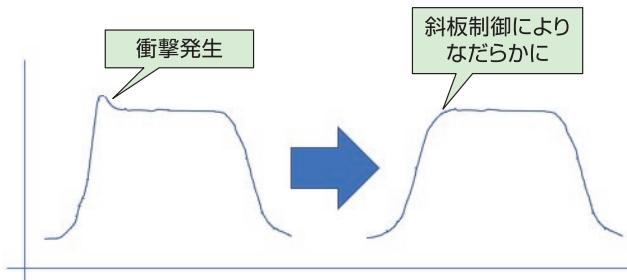


図8 衝撃緩和の油圧波形イメージ図

5-2. 立ち上がり上限規制

通常、油圧ポンプの斜板は、オペレータ操作によりコントロールされているが、圧送負荷が増加し、定馬力制御やエンスト防止制御が働いている場合には、ポンプ回転数により設定された上限トルク値を超えないようユーザ指示値より低い値に制限されている。しかし、Sバルブ切換時には圧送負荷が一瞬ゼロとなるため、Sバルブ切換後の斜板立ち上り時には制限がかからず、ユーザ指令値まで斜板を立ち上げようとしてしまう。これにより立ち上り時の衝撃が大きくなり、ブームの先端ホースのしゃくりが大きくなる。

閉塞等の異常が発生しない限り、圧送負荷が急激に変動することは少ない。そこで、Sバルブ切換前の斜板角情報を記憶しておき、Sバルブ切換後の立ち上がり時には、ユーザ指示値ではなく前回ストローク時の斜板角を上限に立ち上げを行う制御を追加した。これにより、高負

荷圧送時のストローク反転時においても、衝撃音の低減を実現できた。

6. 油温

クローズ回路化により切換バルブがなくなったことで、回路内の圧損が減り、油温の上昇は抑えられると考えられた。しかし、テスト機での評価試験にて油温測定を実施したところ、予想以上に発熱量が大きいことが判明した。発熱源を探ったところ、メインポンプからの発熱が大きいことがわかった。その原因は、斜板駆動用パイロット圧を確保するための低圧リリーフ弁が常にリリーフ状態であるためであるとわかった。オープン回路に対してメリットの多いクローズ回路であるが、デメリットもあることが確認された。尚、これに対しては十分な冷却性能を有したオイルクーラを設置することで対応している。

7. 緊急運転

メインシリンダの駆動制御に様々なセンサを用いたが、これらのセンサが一つでも故障すると、正常な制御ができなくなるため、作業の継続は不可となる。ただし、実際の打設現場では、センサが故障したからと言って、打設を中断することはできず、応急的な打設の継続が必要となる。そこで、各センサ故障時の緊急運転モードをそれぞれ設定し、応急的な打設継続を可能とした。ただし、いずれかのセンサが故障したことをユーザに知らせるために、故障発生時には一旦運転を停止し、ディスプレイに故障箇所を表示した上で、ユーザが緊急運転スイッチをONにすることで、自動で故障内容に合わせた緊急運転モードに切り替わるプログラムとした。さらに電気系統の故障時にも緊急運転ができるように、外部パイロットによる斜板操作が可能な手動操作弁を設置し、Sバルブ作動バルブの手動操作弁との順次操作で、手動による緊急運転が可能な仕様とした(図9)。

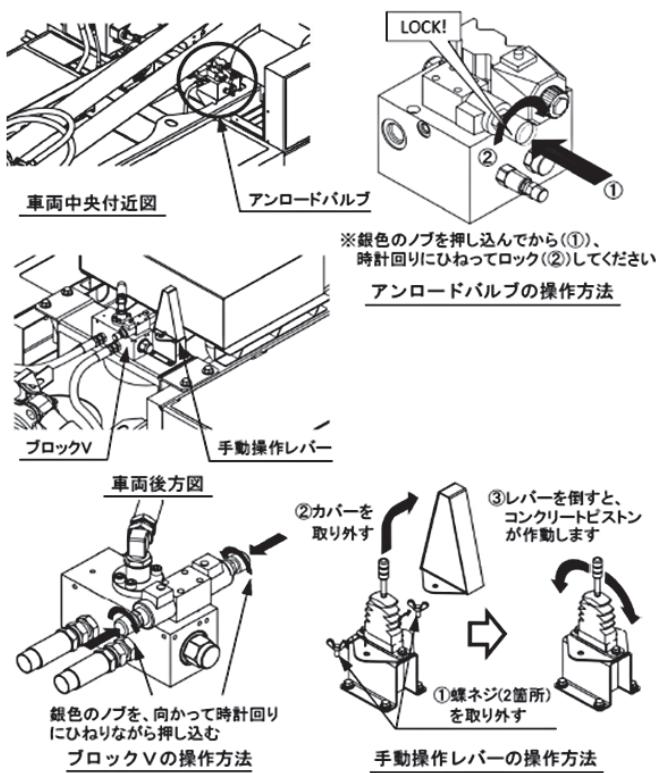


図9 手動運転手順(取扱説明書より抜粋)

8. あとがき

極東開発工業として初めてとなるクローズ回路方式を採用したPY165-39であるが、幅広い吐出量や安全性、静音性に対しご好評をいただいているものの、クローズ回路に対する経験値は低く、改良の余地はまだまだあると考えている。今後も海外勢のCP車に対抗すべく、ユーザからの要望を反映させながら、更なる改良を進めていきたい。

最後に、本機の開発にご協力いただいた関係各位ならびにテスト機のフィールドテストにご協力いただきましたお客様、ゼネコン様各位に心より感謝いたします。