部会報告

コンクリート機械の変遷(5)

機械部会 コンクリート機械技術委員会

第4部 コンクリート吹付機の変遷

1. 吹付けコンクリート機械の誕生

吹付機が世に生まれたのは、明治40年(1907)ア メリカの彫刻家で博物学者 C.E.Akeley がセメントと 砂の混合物を圧縮空気を利用して吹付ける装置を考案 し、3年後にB.C.Collierによって「セメントガン」と 名付けて開発された。大正3年(1914)にピッツバー グ鉱山ではじめて試験採用され、同じ頃トルクレット 社によってヨーロッパで販売が始まり鉱山への導入が 進められた。大正 4年(1915)にトルクレット社がダ ブル圧力釜の連続バッチ式のモルタル吹付機を開発 し、その後昭和5年(1930)にローター式吹付機が開 発された。このローター式は、操作の難しい圧力釜式 に代わって開発されたもので、現在の吹付機の原型と 言えよう。これらの「モルタル吹付機」に対して、よ り高性能の「コンクリート吹付機」が要望され、昭和 17 年 (1942) スイスのアリバー社の技術者 Senn によっ て乾式のローター型コンクリート吹付機が開発され た。またトルクレット社も昭和20年(1945)に自社 のモルタル吹付機を乾式のチャンバー型コンクリート 吹付機に改良することに成功し、昭和22年(1947) に BSM 社 (Beton Spritz Machinen) も独自の乾式チャ ンバー型吹付機を製作した(写真-1)。

わが国では大正3年(1914)房総線の鷹ノ巣トンネルの法面吹付け工に採用されたようで、その後、上越線の清水トンネル等での実績もあるが、ほとんどが明かりの法面吹付け工事であった。

現在我が国の吹付けコンクリートは、明かりの法面および岩盤の吹付け(モルタルまたはコンクリート)とトンネルの支保材としての吹付けコンクリートと大きく二分され、吹付機も共通タイプからそれぞれ専用のタイプが開発され、とくにトンネル用は施工条件から、吹付機以外の要素機器を一体化した吹付けシステムとして発達してきた。

1.1 明かり(法面)用吹付けコンクリート機械

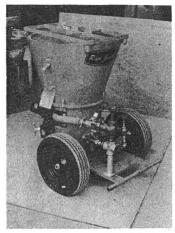
明かり(法面)吹付けコンクリートは、昭和38年(1963)にアメリカのエアブラコ社製のニュークリーター、スーパークリーターが導入され、翌年にはスイスの乾式吹付機アリバ(Aliva)BS-12とアリバ300が導入され、トンネルと明かり(法面)では同じ吹付機が使用されていた。しかし、昭和40年代に入ると明かり(法面)の吹付け工法は大きく変貌した。すなわち現実的に細骨材の管理が困難で、従来の乾式工法では、現地調達をせざるを得ない細骨材の湿潤の状態の程度でトラブルが頻発し、生コン状態で送れる湿式工法に流れていく傾向にあった。そして明かり専用の吹付機の開発が進み、現在の代表的な吹付機 S4型(写



a) アリバー 300

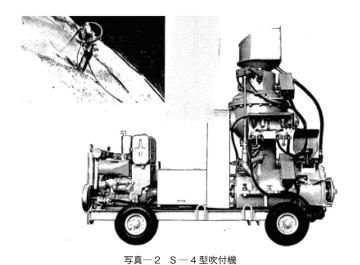


b) トルクレットS3型



c) リードガン・モデル LOVA ⅢR

写真―1 初期のコンクリート吹付機各種



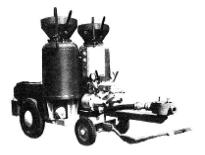
真-2) の原型である NG-1 型湿式吹付機が出現した。

1.2 トンネル用吹付けコンクリート機械

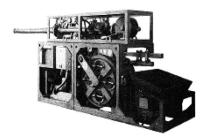
トンネル施工における吹付けコンクリートの本格的 採用は、トンネル支保が鋼製支保工と矢板にかわって 吹付けコンクリートとロックボルト(NATM)になっ てからである。

NATM (New Austrian Tunnelling Method) は昭 和19年(1944)にオーストリアのラブセヴィッツ博 士によって提案された工法で、昭和23~28年(1948 ~53) オーストリア Kaprun 水力発電所 Moll トンネ ル工事での実証試験工事から昭和26~30年(1951 ~55) スイス Maggia 発電所トンネルでの試験等を 経て、昭和31年(1956)オーストリアで特許が与え られた。さらに同博士により NATM (New Austrian Tunnelling Method) と命名され、理論解析、実証が 進展し、ヨーロッパ各国の鉄道・道路トンネル施工の 多くに採用され確たる地位を築いた。このような背景 を受けて, 吹付機の進歩も著しく, 吹付機の改良・発 達がNATM工法を安定化させたと言える。昭和35 年(1960)に入ると、湿式エアー圧送式でチャンバー スクリュー併用型の吹付機(コンパルナス、スピロク リート等)が開発され、続いて湿式ポンプ式のチャレ ンジ社の製品が生まれた(各吹付機の形状について写 真一3に示す)。

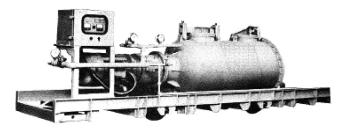
我が国に NATM が紹介されたのは昭和 $37 \sim 38$ 年 $(1962 \sim 63)$ であったが、施工法として定着するのはまだ 10 年以上先のことになるが、当時から吹付けコンクリート単独で採用され始めた。まず、昭和 39 年 (1964) に電源開発七色発電所の資材搬入トンネルでトルクレットによる試験施工が行われ、引き続き、青函トンネルでトルクレット S3- II 型が、さらに昭和 41 年 (1966) には北海道紅葉山線・新登川トンネル



コルパルナス TR-70 型



ショットクリート PC08 — 60M 型

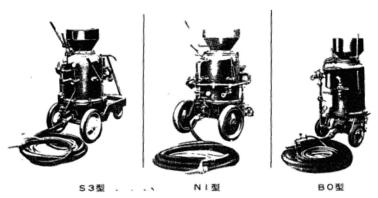


スピロクリート 写真― 3 コンクリート吹付機各種(昭和 35 年代)

の蛇紋岩による膨圧対策試験工事に採用され、吹付けコンクリート工法として普及し始めた(写真—4)。その後青函トンネルが本格的工事になると、トルクレット、コンパルナス、アリバ300型が、吹付けコンクリートを標準支保材(NATMではない)とした公団直轄の先進導坑で採用され、最終的にはアリバ260型(アリバ300型の改良型)が先進導坑のみならず作業坑、本坑でも盛んに使われた。このローター式アリバ260型は乾式(ドライミックスコンクリートを送ってノズル手前で水を添加する方式)の全盛時代を築き、現在でも使われている実績がある。

*現在の吹付け方式はコンクリート機械の変遷 (6) の「湿式・乾式の系統比較図」に示す。

昭和61年(1986)に我が国でNATMが標準工法になると吹付けコンクリートは不可欠な支保材となり、吹付機械も進歩し、多くの機種が生まれた。それらの中でアリバ吹付機は、吹付けコンクリート専用機械として、改良を重ねて、順調な発展をしてきた。とくに乾式の吹付機は専用タイプが全てであったが、その中でも群を抜いた実績を示した。時代の流れとともに品質管理面で通常のコンクリートに近いという理由から、生コンクリートを使う湿式へ傾向が高まり、ア



写真―4 コンクリート吹付機トルクレット各種(昭和35年代)

リバ 260 型のつぎに湿式専用ポンプ式の 270 型 (**写真** — 5), 続いて再びローター式の, アリバ 280 型 (**写真** — 6) が製造された。同機以降は乾湿両用タイプとなった。

さらに280型では、吹付機で最も重要な機能の一つである材料給材装置(バイブレータホッパと排気システム)(図—1)を日本で開発して骨材の粒度、表面水、さらにスランプ変動にも強い吹付機(AL-280FF)となり、その後のアリバ型吹付機の発展の礎を築き、285型(写真—7)、286型(写真—8)と進んで現在に至っている。乾式吹付機は前述したようにローター式が主流で、他にはメナディアGM90(写真—9)、リードガン(乾湿両用機)がある。他にはポケットフィールタイプで、水との混合効率を向上を目指したキャピラーミキシングシステムを採用したSBS乾式吹付機(写真—10)が出現した。

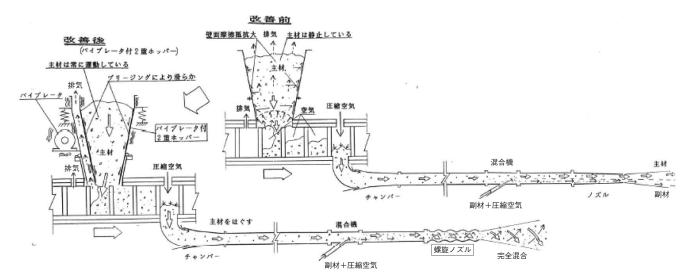
しかし、画期的な技術を組込んだ SBS の吹付機は 乾式専用であることから、湿式への移行していた当時 においては、十分にその成果を発揮するには至ってい ない。湿式における材料は、最終段階で高圧空気によっ



写真一5 アリバ 270 型



写真-6 アリバ 280 型



図―1 材料給材装置(バイブレータ付二重ホッパと排気システム)

てノズルから噴射させるが、空気と混ぜるまでの工程 での材料圧送手段には、材料が生コン状態でありコン クリートポンプの機能が使えることから、当初よりポ ンプ式の吹付機も多く出現した。



写真-7 アリバ 285 型



写真-8 アリバ 286 型



写真-9 メナデイア GM90

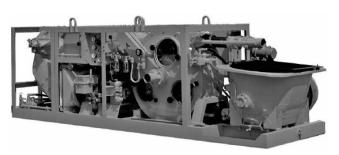


写真— 10 SBS 乾式吹付機

しかし、吹付け用のポンプは打設用のポンプに比べ、 吐出量が非常に小さいこと、ピストン式 (写真—11) ではその弁の切り替えによって発生する脈動や、使用 するコンクリートの配合特性 (打設用よりもポンプ圧 送し難い配合) であることなどの条件により、最終的 にはポンプとしての機構は同じでも最大吐出量を少な めにした吹付け専用タイプが多く出現した。ピストン 式ポンプに対して、スクイズ式 (写真—12) は切換 え弁がなくその分脈動が少ない機構のため、吹付けコ ンクリート用に開発された機種があった。



写真--11 ピストン式



写真―12 スクイズ式

吹付機の機構的分類は以下の通り (ピストン式, スクイズ式, ローター式, など)。

・ポンプ圧送方式(湿式): ピストンスィングバルブ式:プッツマイスタ,サイ ドワインダ.

ピストンバルブ式:技術資源, 古河, シンテック スクイズ式:チャレンジクック(極東開発)

・ローター圧送方式: アリバ 260 (乾式), アリバ 280,285,286 (乾湿式両用) リードガン (乾湿式両用) GM-90 (乾式)

・ポケットフィルタ方式: SBS 吹付機(乾式)

また、基本吹き付けシステムはコンクリート機械の変遷 (6) の添付資料「コンクリート吹付機の経緯一覧表」に示す。

2. 吹付けコンクリートロボット(ノズルマニピュレータ)

吹付け施工時に吹付けノズルを保持する方法は,当 初は人力が主流であった。とくに吹付け(ノズル)方 向が横向きから下向きが主体となる明かりでは,現在でも人力が一般的である。しかし上向きが主体で高所まで吹付けを施工するトンネルでは事情が異なり,早くから機械によるノズルの保持,移動(将来のロボット)が検討され,実用化されてきた。

即ちトンネルでの吹付けコンクリート施工は坑内から天端、側面と範囲が広く、空洞化した内側には足場がなく、しかもノズルを上向きにする場合が多く、ノズルマンが直にノズルをもって吹付けコンクリートを行うと、リバウンドの材料をまともに受け、粉じんが多く発生する環境の中で重いノズルを持った過酷な作業となり、作業環境上、安全上からも人力に代わるノズルを保持するロボット(マニピュレータ)が必然的に出現し採用されてきた。ロボットの初期のマニピュレータは専用の機構ではなく、別の建設機械(例えば油圧ショベル)のブームを使ってノズルの保持装置を付加したものが盛んに用いられた。

現在では、吹付け専用のマニピュレータが圧倒的に多く、それが標準タイプとなっている。用途別では、鉄道、道路、水路トンネルの大断面から小断面用まで、あらゆるトンネル形状・断面に適合するタイプがある。 以下にこれまで製造された吹付けロボットを機構別に解説する。

2.1 初期の吹付けコンクリートロボット

(1) 吹付け作業足場としてのロボット

これは本来の吹付けロボットと言えないかもしれないが、吹付けロボットの進化の段階ではかなり重要な位置を占め、かつ、現在でも簡易的に使われることがある。とくにトンネル吹付けコンクリートの発祥地であるヨーロッパでは、現在でも使われている。手吹きではノズルを適切な位置にもっていくための足場がトンネル内壁にそってあらゆる位置に必要となるため、移動できる台車と旋回、伸縮、角度の自由度を持つブームにノズルマンを載せるバスケットとを組み合わせた形(写真―13:移動式高所作業足場)になる。現在では短期および部分的に吹付けコンクリートを施工するような規模の場合には採用される場合がある。そして人間によるノズル保持・操作を機械化して、足場としてのブーム機構と組み合わせた形態がその後のノズルマニピュレータ、いわゆる吹付けロボットとなっていく。



写真—13 移動式高所作業足場

(2) 他の建設機械のブームの流用

このタイプのロボットは、吹付けコンクリートが始まった当初に応急的に用いられたものが中心である。その母体となる建設機械は、油圧ショベルがほとんどで、当初はそのバケットにノズルを固定して、従来の油圧ショベルの機能のみでノズル操作をしていた(図ー2)。しかし掘削作業時のバケットの動きと違って吹付け作業はノズルの移動過程が重要(トンネル内壁に沿って連続的に移動)となるため、施工性をはじめとして、付着、仕上がり、跳ね返り等で十分満足のいく結果は得られなかった。

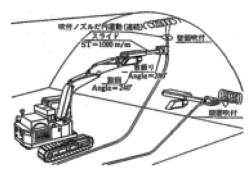


図-2 油圧ショベルに直付けしたロボット

(3) 他の建設機械のブーム+専用アタッチメント

このタイプは、NATM 初期から発展期にかけて多く採用された、大断面(2 車線、複線断面)用の代表的な 1 タイプで、距離のある空間中の位置確保には油圧ショベル($0.4 \sim 0.7 \, \mathrm{m}^3$ クラス)の足回り、メインブームを利用して、新規にノズル部分の細かい動作機能を持ったアタッチメントを付加した形態で実用化された。前述したようにこの種のブームでトンネル断面に沿ってスムーズにブーム先端を移動させることは、十分でなく、これを補うためのアタッチメントが開発された(写真—14)。基本部分が既存機のため、実用性があり、当初は多くの機種が存在した。なお、この頃から、ロボットの操作はリモコン式が原則で、ノズル



写真-14 油圧ショベルに専用アタッチメント付

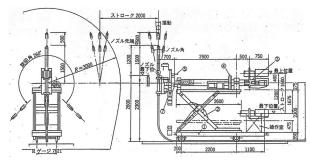
マンの最も都合のよい場所へ,操作ボックス(有線)を持ち運んで行うことが原則となり,吹付けコンクリートの品質,安全,作業環境性において,飛躍的な効果を示した。

(4) 吹付けコンクリート専用ブーム

建設機械(油圧ショベル)を基本としたブーム構成は、本来の機能である掘削するためには最も合理的な動きができるが、トンネル内の壁面に沿った滑らかな3次元の動きには不備な点が多く、大容量の本格的な吹付け作業に対して施工性をはじめとして、付着、仕上がり、跳ね返り等で十分満足のいく結果は得られなかった。このため、ノズルが本来の吹付けに最も適した方向、位置に移動できる専用のブームが開発され現在にいたっている。

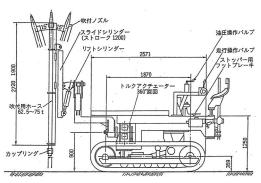
①断面限定型吹付けロボット

一定のトンネル断面を想定して、考えられたタイプで、ノズルが円筒状のトンネル内壁に常に垂直に面して移動できるよう、トンネル軸を中心に断面内で旋回する極座標ブームで、とくに小断面トンネルを対象としたものが多く、レール方式の場合、ノズルを保持した伸縮ブームの固定中心をトンネル中心高さに一致させられるパンタグラフ式上下昇降機構、ノズルがトンネル軸方向前後に移動できる回転軸のスライド機構で成り立っている(断面中央への位置決めは、トンネル内中央に敷設されたレールで決まる(図一3))。レールの代わりにクローラの足回りを履いたタイプでは、通常の2車線(複線)断面クラスの上半先進ベンチカッ



図一3 断面限定型吹付口ボット

ト工法において上下半で稼働できる、機動性の高い専用ロボットで、NATMが始まった初期に開発された。 ノズルの方向は上記と同様のトンネル断面において極座標に動き、その回転軸の高さは一定であるが回転角毎にノズルを保持するブームの長さを伸縮させ、前後にはクローラの前後進で吹付け面に極力垂直に向けることができる。小型、軽量、機動性に富んでいたので結構重宝に使用された(図一4)。



図―4 初期の専用吹付け口ボット

2.2 NATM 円熟期 (現状も含む) の吹付けコンク リートロボット

(1) リンク機構を主体にした専用ブーム

ブーム根元には回転機能(根元ロータリー)を備えトンネル断面内を極座標系(ブームを半径とした根元の回転角)で動き、割合小型で、トンネル半径、軸方向もリンク機構でリニア運動させる(図 5)。

(2) スライド機構を主体とした専用ブーム

ブームの伸縮(半径方向)、トンネル軸方向もスライド機構、ブームの根元はロータリー機構がなく、ヨーイングとチルト機構でトンネル断面方向は断面内座標(xy 軸運動)で動き、トンネル壁面に沿った円周方向の連続的な動きには、ヨーイング、チルト、ブーム伸縮の3方向の操作を同時に行う必要がある。構造上、

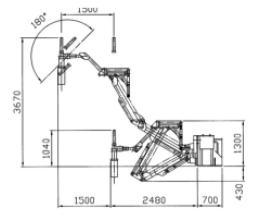


図-5 リンク機構を主とした専用ブーム

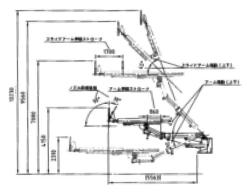


図-6 スライド機構を主とした専用ブーム

ノズルの保持力が大きく、大容量吐出方式あるいは、 ノズルまでポンプ圧送する方式には有利である(**図**— **6**)。

(3) リンク・スライド両機構併用型専用ブーム

トンネル軸方向のように単調なリニア運動にはスライド機構とし、トンネル断面方向には、その円周形状に運動軌跡を合わせたブーム根元にロータリーをつけた理想的な組み合わせに近づけた機構である。ただし超大断面で回転半径が大きくなり、しかも大容量吐出でのノズルの重量が増大すると根元のロータリーへの負担が大きくなり、故障のトラブルが増える傾向にあるため、上記スライド機構を主体としたブームへ移行

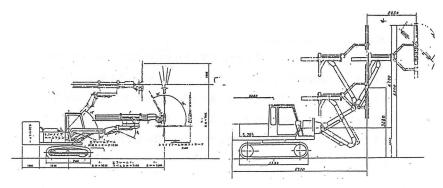
する傾向がある (図─7)。

(4) 自動吹付けロボット

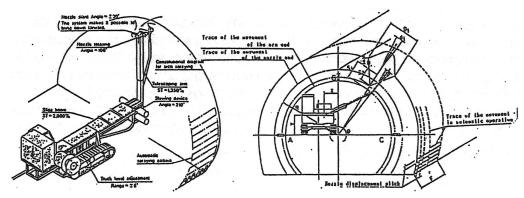
これまでの吹付けロボットの操作は、人力によるリモコン操縦で開発されてきた。しかし機構が複雑化し、その機能を十分に発揮させるためには、自動操縦(自動化)への試みは当然の流れかもしれない。とくにNATM発展期は、高度成長の時期にあたり、建設業のロボット化の機運が高く、よけいに拍車がかかった時期でもあった。ロボット機能としては以下のようなものであった。

- ・吹付け面とノズルの角度、距離を一定に保つ
- ・吹付けが均一かつ一様になるように、ノズル移動ス ピードを一定または所定のスピードに制御する
- ・ノズルの移動軌跡を決めて、自動で移動させる

これらの機能を制御方式で分類すると、シーケンス制御方式とティーチングプレイバック方式とがある(図-8)。ティーチングプレイバック方式は、シーケンス方式に比べ自動化レベルでは、はるかに高度になっているが、発破掘削のような変化の激しい吹付け面の状態を正確にティーチングすることは現実的に難しく、またその手間を考えると実用面からは、人の直視による操縦の方がより現実的であるという判断から、いずれも試験の段階を超えることはできなかった。



(スライド機構を主体とした吹き付けロボットと多関節とスライド機構マニピュレータ) 図―7 リンク・スライド機構併用型専用ブーム



図―8 シーケンス制御方式(左)とテイーチングプレイバック方式(右)