

3. 低粉じん吹付け機における施工実績

エアレス吹付け機の低粉じん性と普及への改善点

株式会社フジタ

株式会社フジタ

リブコンエンジニアリング(株)

○ 橋詰 亮

野間 達也

門倉 智

1. はじめに

現在、トンネル工事の多くはNATMにより施工されている。切羽では穿孔、発破、ずり出し、コソク、吹付けコンクリート、鋼製支保工建て込み、ロックボルト打設を繰り返すことでトンネルを構築していく。吹付けコンクリートは、壁面にコンクリートを密着して設置する支保部材であり、トンネル工事における作業の中でも、最も粉じん濃度が高くなることが分かっている。

粉じん濃度は、厚生労働省が平成12年に策定した「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」（以下ガイドライン）にて、粉じん濃度目標レベル3（ mg/m^3 ）が初めて示された。

従来の圧縮空気によって圧送する吹付け方式では、この目標値をクリアすることが難しく、粉じんを低減する新たな吹付け技術が求められていた。

当社ではこの対策として、圧縮空気に頼らず回転装置を高速回転させることでコンクリートを打撃・投射し地山に吹付けるエアレス吹付け機を開発・導入した。

本稿では、エアレス吹付け機の施工結果と改善案を報告するものである。

2. エアレス吹付け機概要

従来の吹付け方式では、圧縮空気の力によって、コンクリートを噴射し地山に吹付けている。これに対しエアレス吹付けでは、コンクリートを打撃・投射し、地山に吹付けるものである。

写真-1にエアレス吹付け機全景を示す。エアレス吹付け機は、通常の吹付け機をベースとし、ロボットアーム先端にはエアノズルに代わり、インペラヘッドと呼ばれる回転装置が搭載されており、吹付け機本体には、インペラ駆動油圧ユニット、スラリー急結剤添加装置、急結剤圧送用コンプレッサーが搭載されている。また、急結剤はスラリー急結剤の他に、液体急結剤の使用も可能となっている。

回転装置であるインペラヘッド（リブコンエンジニアリング社製）の構造は、図-1に示す様に、

- ・回転体のインペラ
- ・駆動油圧モータ
- ・インペラを覆うケーシング

から構成されており、簡単に取外し可能となっている。インペラには、コンクリートを投射するための4枚の羽根（インペラブレード）が取り付けられており、直径300mmの2枚のインペラリングが、ブレードを挟み込むように取付けられている。

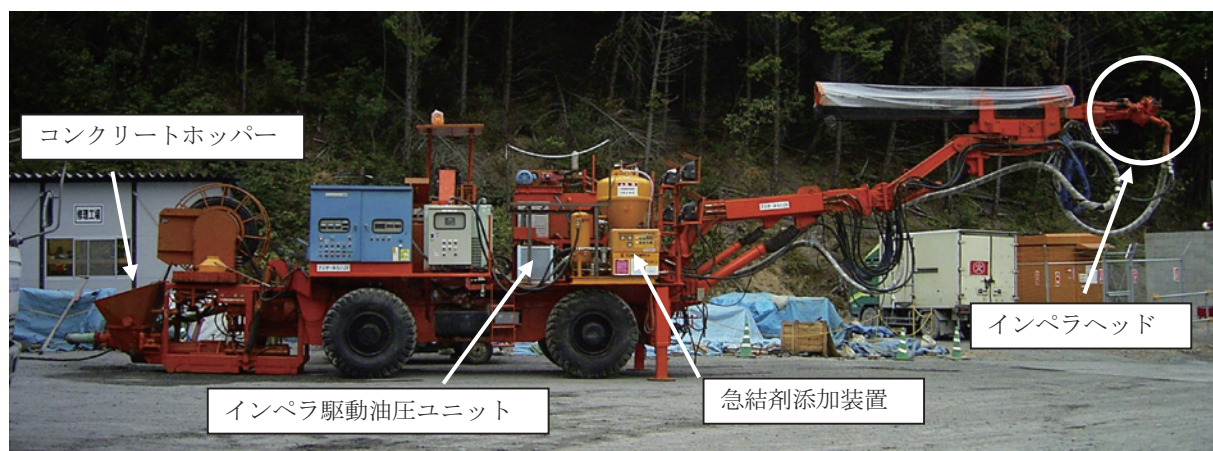


写真-1 エアレス吹付け機（2号機）全景

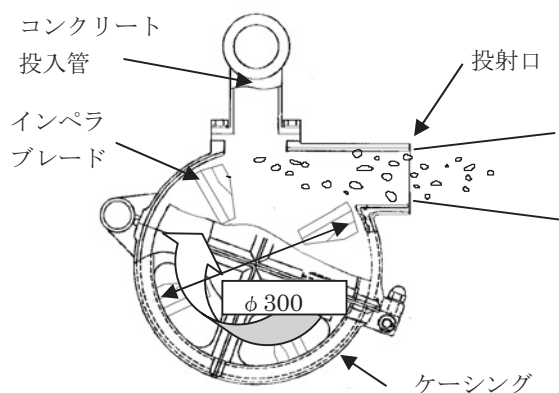


図-1 インペラヘッドの構造

インペラを覆うケーシングには、コンクリート投入管（φ65mm）と投射口（80mm×104mm）が設けられており、インペラヘッドの総重量はケーシング、駆動油圧モータを含め約70kgである。

次に吹付け方法の概要であるが、コンクリートはエアレス吹付け機後方のコンクリートホップから投入され、配管・耐圧ホースを通り、インペラヘッドまでポンプ圧送される。投入管からインペラヘッド内に圧送されたコンクリートは、4枚のブレードによって打撃・投射され、地山に吹付けられる。なお急結剤の添加方法としては、スラリー急結剤の場合には、インペラヘッド手前のY字管にてコンクリートに混入され、液体急結剤の場合には、インペラヘッドから投射されたコンクリートに直接噴射し添加を行う。

また、インペラの回転数は、無負荷時においては2800rpm、コンクリート投射時には2000～2600rpmもの高回転で駆動しており、時間当たり12m³の投射を可能としている。

当社ではこれまでに、エアレス吹付け機を3台運用しており、この3台の諸元を表-1に示す。

2.1 エアレス1号機



写真-2 エアレス1号機

最初に製作されたエアレス1号機は、プツマイスターWKM-1183impをベースマシンとして製作された。1号機の全景を写真-2に示す。本機では、急結剤は液体急結剤を使用しており、2006年～2007年まで運用を行った。

当機の問題点としては、

- ①マニピレータを稼働させるシリンダージャッキがインペラヘッドの重量に対し小さかったため、トンネル天端部での動作が遅い。
 - ②インペラヘッドの作動角が狭く自由度が低い。
- といった、施工性の課題が挙げられた。

2.2 エアレス2号機

上述した、エアレス1号機での問題を解決するために、TCM製CSD90YKをベースマシンとした、エアレス吹付け機2号機が製作された。インペラヘッドの仕様は1号機と同じであるが、急結剤は新たにスラリー急結剤が採用された。当機ベースマシンには、コンプレッサが搭載されていないため、スラリー急結剤を圧送するためのコンプレ

表-1 エアレス吹付け機比較表

		1号機	2号機	3号機
ベースマシン	メーカー	プツマイスター	TCM	古河ロックドリル株式会社
	型式	WKM-1183imp	CSD90YK	CJM2200E-I
コンクリートポンプ	型式	PM-BST1003FFH	テックマン M2000V	CP1
	吐出力	30m ³ /h	30m ³ /h	22m ³ /h
総重量		11ton	16ton	18ton
作業範囲	水平	11.2m	13.2m	12.4m
	垂直	11.5m	10.0m	9.6m
急結剤		液体急結剤	スラリー急結剤	スラリー急結剤
コンプレッサ		非搭載	搭載	2台搭載(22kw, 90kw)
工事での実績		・近畿自動車道(敦賀線)高浜トンネル東工事 ・主要地方道鳥取鹿野倉吉線道路改良工事 (三朝トンネル) ・平成15～17年度木岐トンネル工事 ・第二東名高速道路 静岡第一トンネル	・四国横断自動車道久礼坂トンネル工事 ・東九州道(県境～北川間) 古江トンネル南 新設工事	・東九州道(県境～北川間) 古江トンネル南新設工事

ッサーを搭載している。2号機は2007年～2009年の間運用され、当機でエアレス吹付け機の基本構成が完成し、現在のエアレス吹付け機の構成となった。

2.3 エアレス3号機

エアレス3号機は、2号機ベースマシンの老朽化に伴い、2009年に新たに製作された。エアレス3号機の全景を写真-3に示す。エアレス3号機は、古川ロックドリル製 CJM2200E-I をベースマシンとし、ロボット部はジャンボのアームを流用している。急結剤は、2号機と同様にスラリー急結剤を採用しており、ベースマシンには、22kW のコンプレッサーと 90kW のコンプレッサーを搭載し併用している。



写真-3 エアレス3号機

2号機では1号機で問題となった、吹付けの自由度は解決されたが、吹付け開始前や、清掃時の手間が目立った。そこでベースマシンの変更に伴い3号機では、これらの手間を通常の吹付け機と同等にすることを目指した。

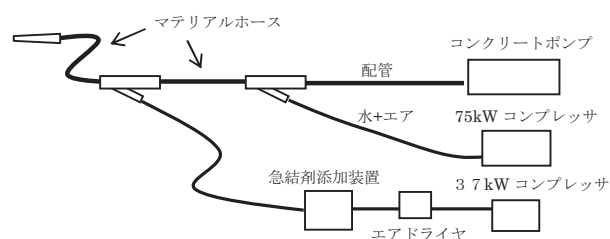
図-2に通常の吹付け機、エアレス2号機、エアレス3号機の配管略図を示す。

吹付け開始前、エアレス2号機では、インペラヘッドまでコンクリートポンプだけで圧送を行わなければならないため、先にセメントペーストやモルタルを圧送し、ホース・配管の内面の潤滑性を良くする必要がある。通常の吹付け機では、ポンプ圧送とエア圧送を併用しているため、閉塞の危険の高いホース内も、先送りモルタルが不要となっている。

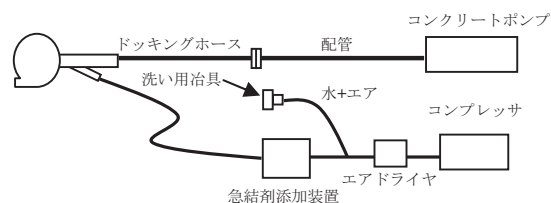
また、施工中のトラブルで最も多かったのが、この最初のコンクリート圧送でホースや配管を閉塞させてしまうことであり、エアレス2号機までは配管を外し洗浄する必要があった。

そこでエアレス3号機では、図に示したように、配管とドッキングホースの境にY字管を新たに設け、エアを補助的に送れるように変更した。これにより、通常の吹付け機と同様に、ポンプ圧送とエア圧送を行うことができ、先送りモルタルが不要になり、配管・ホースを閉塞させる確率を大幅に減らすことが可能となった。

通常の吹付け機



エアレス2号機



エアレス3号機

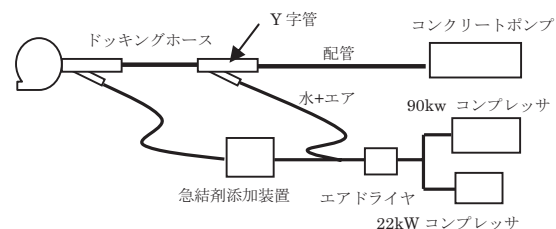


図-2 配管略図

また、吹付け終了後の清掃に関しても、完全にエアが使えなかったエアレス1号機では、配管内にスポンジを投入して洗浄水をポンプ圧送する必要があり時間と労力を要した。エアレス2号機では、水+エアで清掃を行うことが出来たが、ホースと配管接続部を外す必要があり、洗い専用治具を用いて、インペラヘッド側のホース、コンクリートポンプ側の配管を洗浄するため、清掃にはおよそ30分程掛かっていた。

新たにY字管を設けたエアレス3号機では、コンクリートポンプ側は配管を外し洗浄する必要があったが、インペラヘッドのあるドッキングホース側は、吹付け終了後即座に洗浄を行うことが可能となった。また使用する水量を増やしたことで、インペラの清掃も以前と比べ、確実に行える様になった。また清掃に掛かる時間も通常の吹付け機と変わらない10分～15分にまで短縮することが可能となった。

なお、エア圧送を行うのは、吹付け開始時と洗浄時及び配管・ホースの閉塞時であり、吹付け中には、エア圧送を行わない。

3. 粉じん濃度測定

吹付け時の粉じん濃度について、試験施工を行いエアレス吹付けとエア吹きとの比較を行った。その結果を以下に示す。試験施工は、液体急結剤を使用した場合と、スラリー急結剤を使用した場合のそれぞれを示す。

3.1 液体急結剤を使用した試験施工

(1) 試験概要

エアレス吹付け機の急結剤の添加方式は、液体急結剤による方式であった。図-3 に添加方式を示す。液体急結剤は投射口から投射されたコンクリートに直接噴射ノズルによって添加される。

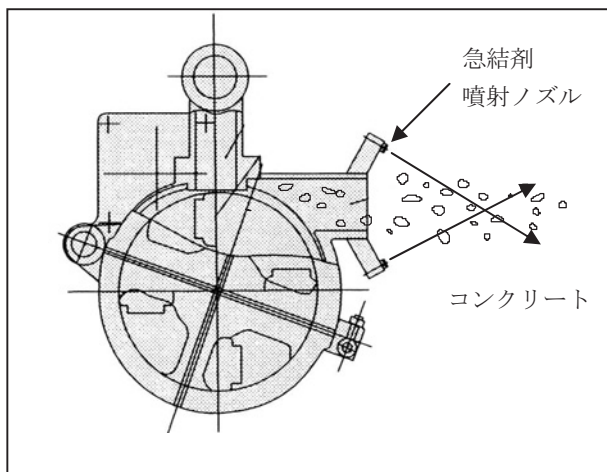


図-3 液体急結剤添加方式

液体タイプの急結剤を使用する場合には、ベースコンクリートの配合を変更する必要がある。液体急結剤の添加により実際の単位水量が増加するため、ベースコンクリートの水セメント比および単位水量を従来の粉体急結剤の配合に比べて小さくしなければならない。表-2 に通常の吹付けコンクリートの配合と、液体急結剤を使用した試験用のコンクリート新配合を示す。試験施工では、
①通常のコンクリート配合をエア吹きで吹付ける。
②新配合のコンクリートをエア吹きで吹付ける。
③新配合のコンクリートをエアレス吹付け機で吹付ける。

以上の3種類を実施し、粉じん濃度を測定した。粉じん濃度は、光散乱式デジタル粉じん計を用い、測定方法は「地下工事における粉じん測定の指針」に準じた。測定位置は、切羽及び、切羽より 50m

表-2 吹付けコンクリート配合

配合	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				混和剤 C×%
			C	W	S	G	
通常配合	60.0	62.0	360.0	216.0	1147.0	721.0	0.0
新配合	45.0	60.0	430.0	194.0	1110.0	758.0	0.5

後方で測定した。さらに労働省が策定した「ガイドライン」の中の測定方法（切羽より 50m 後方において 10 分以上の平均値）も実施した。

(2) 試験結果

表-3 及び図 4, 5, 6 に粉じん測定結果を示す。吹付け方式が圧縮空気による方式の場合、粉じん濃度はコンクリートの配合に関わらず、どの地点においてもほとんど変動していない。

一方、エアレス吹付けでは、粉じん濃度が著しく低減している。エアレス吹付けの粉じん濃度は、エア吹付けと比較して切羽部では約 80%，50m 後方では約 50%減少する結果となった。

表-3 験施工結果

吹付方式	コンクリート 配合	切羽部 mg/m ³	50m 後方部 mg/m ³	ガイドライン による方法 mg/m ³
従来方式	通常配合	14.4	3.4	3.4
	新配合	13.5	3.1	2.6
エアレス	新配合	2.9	1.6	1.4

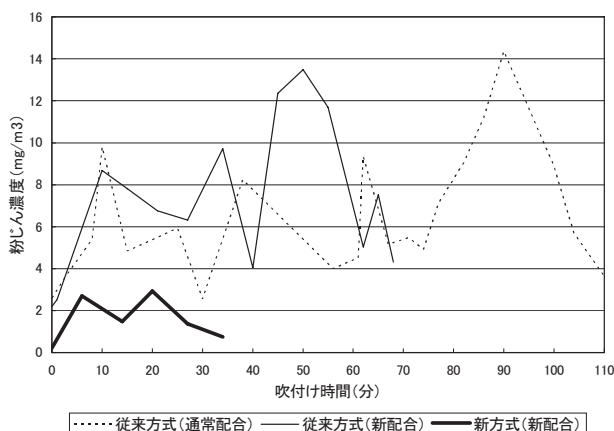


図-4 粉じん濃度測定結果（切羽）

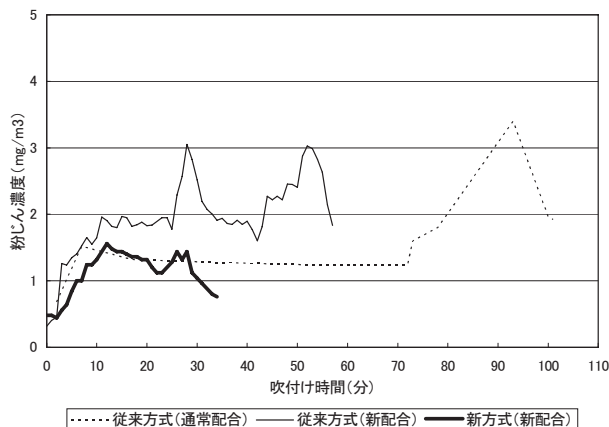


図-5 粉じん濃度測定結果（50m 後方地点）

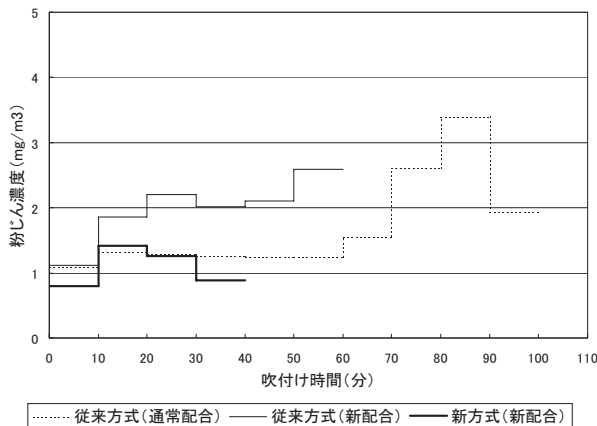


図-6 ガイドラインによる粉じん濃度測定結果

試験の結果、エアレス吹付けでは粉じん濃度が大幅に低減されることが明らかになった。また、液体急結剤は弱酸性であるため、人体や環境にやさしく、液体急結剤を使用した吹付けコンクリートは長期強度や耐久性に優れるという特徴がある。

しかし課題として、液体急結剤を使用した場合、通常よりセメント量が増え、コンクリート材料費が増加する。急結剤の添加率が増加するといったデメリットがある。

3.2 スラリー急結剤を使用した試験

エアレス吹付けにより発生する粉じん濃度は、「ガイドライン」に示される目標値を達成することができた。しかし液体急結剤を使用した添加方式では、急結剤がコンクリートと均一に攪拌されず、コンクリート強度に不均質さが生じる品質の問題や、粉体急結剤と比較して瞬結性に劣るために厚吹きが困難になるといった施工性の問題があった。

そこで、液体急結剤と粉じん発生量が同等であるスラリー急結剤をエアレス吹付け機と組み合わせ、大断面である第二東名・静岡第一トンネルにて施工を行った。

(1) スラリー急結剤

スラリー急結剤を用いた吹付けは、急結剤をスラリー化水により連続的にスラリー化し、コンクリートに添加する方式である。スラリー化には、スラリーショットシステムを用いて、適正な水急結剤比とする。

図-7にスラリーショットシステムの概略図を示す。急結剤は添加装置より、Y字管の手前にあるスラリー化ノズルまで、粉体にてエア搬送される。スラリー化ノズルにて水と混合させ、Y字管にてコンクリートに添加される。液体急結剤添加時と異なり、コンクリートに混合する直前で連続的にスラリー化して添加するため、投射時にはコンクリートと、十分攪拌された状態となる。またスラ

リー化するため、発生粉じん量を低減でき、飛散した場合にも浮遊時間が短く、早く沈降するメリットがある。スラリー急結剤の主成分は、セメント鉱物系の粉体急結剤と同じであるが、スラリー化に適した専用の急結剤を使用する必要がある。またベースコンクリートには、練混ぜ時に急結剤を添加する必要がある。急結剤は水溶性高分子からなる粉体の混和剤で、添加率は対セメント0.02質量%である。表-3に施工時に使用したコンクリート配合を示す。

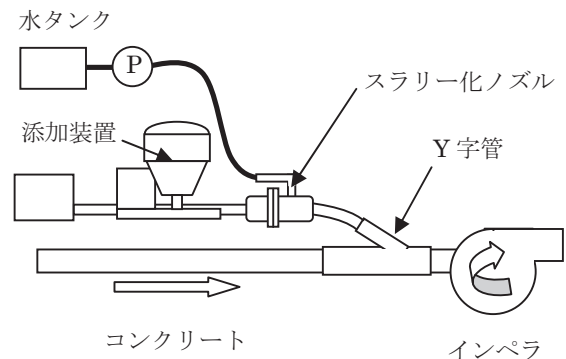


図-7 スラリーショットシステム概略図

表-3 コンクリート配合

W/C %	s/a %	単位量(kg/m³)				高性能 減衰剤%	急結助剤 %
		C	W	S	G		
60.0	62.0	360.0	216.0	1147.0	721.0	1.05	0.002

(2) 試験状況

図-8に施工時の機械配置とデジタル粉じん計(LD-3K)の配置状況を示す。図に示されているように、デジタル粉じん計は切羽より10m地点左側に1台、切羽より50m地点には左側と中央の2台を設置している。また、換気条件としては風管より送風量3000m³/分、大型集塵機は2000m³/分・1500m³/分各1台である。

(3) 施工結果

図-9に切羽10、50m地点における発生粉じんの経時変化を示す。

図に示されているように、切羽50m地点では部分的に突出しているものを除き、ほぼ1.5mg/m³以下となっていることが分かる。これは、エア＋スラリー急結剤の場合では3mg/m³程度であるのに比較すると、約半分の粉じん量となっている。また、切羽10m地点においても、ほぼ2.5mg/m³以下であり、環境が改善されていることが分かる。

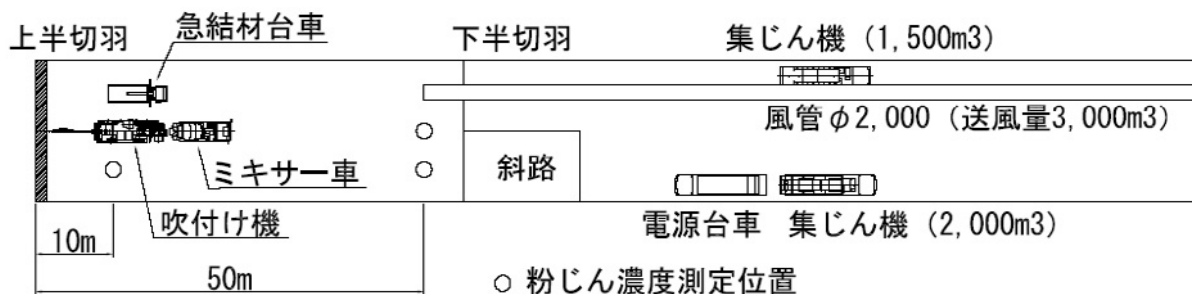


図-8 機械配置図

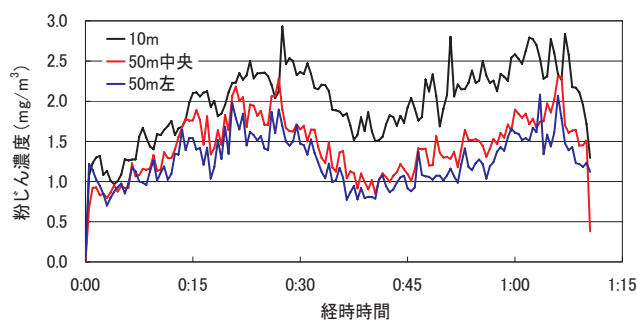


図-9 発生粉じん経時変化

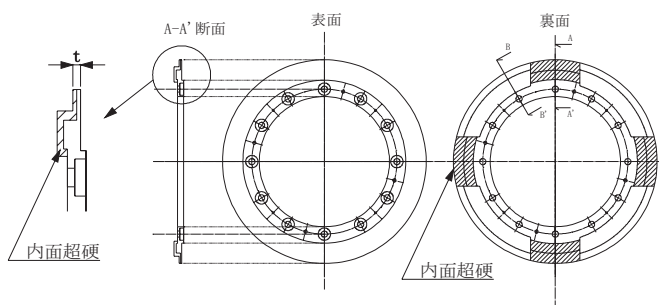


図-10 インペラリング

4. 問題点および今後の課題

エアレス吹付けが、「ガイドライン」で示された目標値 3.0 (mg/m³) をクリアすることを、これまでの試験施工で証明した。またエアレス吹付け機も3号機となり、施工性も十分に改善されてきた。しかし普及には、まだいくつかの問題がある。

(1) インペラの消耗

エアレス吹付けでは、インペラは 2800rpm もの高回転でコンクリートを打撃・投射を行っている。そのため、インペラヘッドは磨耗し交換が必要となる。特に消耗が激しいのが、インペラリングとインペラブレードである。図-10 にインペラリングを示す。これらの部品の磨耗が多い部分には超硬部材が取り付けられているが、打撃の衝撃により割れてしまうことも稀にある。

現在の交換頻度では、交換に手間かかり、コストも通常のエア吹きと比べ大きくなっている。

(2) 施工能力

エアレス吹付け機における、施工能力の実績は 10m³~12m³/h 程度であり、通常のエア吹きと比べるとまだ劣っている。そのため 1 回の吹付け量の多い大断面での施工では、サイクルに大きく差がでると考えられる。

以上 2 つの問題点が上げられたが、その対策として、(1) の消耗品については、より磨耗に強い素材への変更が考えられる。しかし超硬部材の様に硬度が高い素材では打撃の衝撃で割れてしまう恐れがある。そのため、硬度と靱性のバランスを考えた素材選定を進めている。また材質変更に加え、母材へのコーティングも有効な手段であ

ると考える。ただし母材と同様に、耐磨耗性に優れた高硬度皮膜では、衝撃により破壊される恐れがある。そこで高硬度膜と衝撃に強い高靱性膜を幾層にも重ね合わせたコーティングを部材に施すことで、衝撃と磨耗に強いインペラリングの製作を検討中である。

(2) の施工能力に関しては、回転数を上げることが最も有効であるが、駆動モータが大きくなりインペラヘッド自体の重量増大が問題となってくる。そこでインペラヘッドの投射口やインペラブレードの寸法・形状の変更することで投射効率を上げることが今後の課題である。

5. おわりに

エアレス吹付け機の低粉じん性は、環境のみではなく視界の良さも確保され、これは施工性の向上にも反映している。また3号機になったことで、吹付け準備や清掃の時間を短縮することができた。今後、エアレス吹付け機を普及するために、課題となる耐久性と経済性に優れた消耗部材の使用、投射能力の向上に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：トンネル工事における吹付け作業時の発生粉じん対策技術の手引き（案），H17年
- 2) 野間達也，大下武志，堀内喜久雄，赤坂雄司，坂口武：粉じん低減を目的とした実大規模トンネルでの吹付け実験，H17年