

# 吹付コンクリートによるトンネルの1次覆工

—青函試掘トンネルの成果を中心として—

粕谷逸男\*

## 1. はしがき

1962年、筆者はオーストリア・チロルのカウンタール発電所の圧力トンネル、その他のトンネル工事現場を訪れ、吹付コンクリートを支保工がわりに使用しているのを瞥見した。そしてヨーロッパにおける同工法の現況について二、三発表した<sup>1)2)</sup>。その際吹付コンクリートによる仮巻の利点はきわめて大きいので、従来からある支保工、防護工を広範囲に駆逐して、今後大いに発展するであろうと述べた。しかし実際のところ、このときにはまだ吹付工法が技術的にきわめてむずかしい工法であることと、経済的に実施可能なものであるかどうかについて大いに疑問を持っていた。そこで日本鉄道建設公団が青函トンネルの調査を進めている吉岡鉄道建設所で、諸種の調査研究を行ない、技術的にもまた経済的にも十分成り立つことが判明したので、ここにその結果を紹介することにした。

また吹付コンクリートによる仮巻は、初め支保工に代るべきものと考えていたけれども、実は覆工の一部となるべきものであるとの見解に立つに至ったので、吹付コンクリートによる1次覆工と称することにした。

## 2. 吹付コンクリート工法の発達

最近オーストリア、西ドイツ、スイスではトンネル掘さくに当って支保工を施すことなく坑壁にコンクリートを吹付けて、掘削後ただちに1次覆工を完成させる工法が発達した。これら各国で行なわれている吹付コンクリート工法は、セメント、骨材およびセメント急結剤の乾燥状態における混合物を、圧縮空気によりコンクリート吹付機からホースでノズルに送り、ここで水を加えて既存のコンクリートまたは地山の表面に、新しいコンクリートを圧縮空気吹付けのいわゆる乾式工法である。

\* 正会員 日本鉄道建設公団海峽線調査部長

この工法は50年ぐらい前からあった。しかし当時の機械では使用する砂利の最大粒径は5mmまでであり、しかも完全に乾燥させなければならず、また1回の吹付け厚さも約2cmに限られていた。近年になってコンクリート吹付機に大改良が加えられ、使用骨材の最大粒径も25mmまでとなり、しかも自然の湿潤状態のまま使用することができるようになった。また1回の吹付け厚さもセメント急結剤の使用により20~30cmとなり、機械の能力も1~5m<sup>3</sup>/hと大いに向上した。また吹付位置と吹付機ミキサ材料置場との距離は、3~400mもとることが可能となった。このようにして吹付コンクリート工法を採用することにより、掘削直後に1次覆工を施工する可能性が生じたのである。

## 3. 吹付コンクリート工法の問題点

吹付コンクリート工法はまだ誕生して間もない工法なので、種々の問題点がある。その第一は吹付作業にともなって必ず起こるはね返りによる損失である。第二にこのはね返りにより付着したコンクリートは、ノズルから噴射されたコンクリートとは配合を異にすることであり、第三にいかにしたらこのはね返りによる損失を少なくすることができるかということである。

### (1) はね返りによる損失

コンクリートが既存のコンクリート面または地山に吹付けられた場合、吹付けを開始した当初には骨材はすべてはね返ってしまい、壁面には粘性に富んだセメントペーストだけが付着する。壁面がセメントペーストの薄膜でおおわれて初めて、細砂がこれに貫入して付着する。このようにしてモルタルの層が徐々に成長するにつれて、粒径の大きな骨材もモルタル層中に突入して付着し、コンクリートが形成される。しかし、すでに埋込まれた粗骨材にたまたま衝突した骨材は、はね返って落下する。このようにして最後まである量の材料は、はね返

表-1 材料別はね返り率

配合記号	実 使 用 材 料				はね返り量 (kg)	はね返り 単位重量 (kg)	は ね 返 り 率				付着コンクリートの w/c (%)
	C (kg)	S (kg)	G (kg)	S/A (%)			全体 (%)	C (%)	S (%)	G (%)	
II	1500	4518	3684	55	1623.6	2424	15.8	10.8	11.1	24.0	38.5
III	2000	5280	5256	50	2035.0	2404	15.1	12.6	10.0	21.8	41.4
V	950	4134.4	2219.2	65	803.7	2340.2	10.1	7.7	8.1	15.0	55.1
VI	800	3212.8	2134.4	60	680.0	2456.4	10.0	6.9	6.4	18.6	59.6
VII	950	3499.8	2853.8	55	885.0	2455.3	11.2	8.7	8.5	17.5	51.7

- 注 ① 吉岡建設所における試験成績による。  
 ② 材料は重量計量し、傾胴ゼガーマキサにより空練りした。はね返り量は重量計量による。  
 ③ はね返り単位重量とは、はね返ったものを洗い分析試験して計算した値である。  
 ④ 材料別はね返り率は、たとえば粗骨材についてはつぎの計算式による。

$$\text{骨材のはね返り率} = \frac{\text{（はね返り単位重量中粗骨材の量）} \times \frac{\text{（はね返り量）}}{\text{（はね返り単位重量）}}}{\text{（実使用材料中粗骨材の量）}} \times 100 (\%)$$

表-2 吹付配合, 付着配合, はね返り配合とはね返り率

混合機種	配合記号	はね返り率 (%)			単位水量 (kg)			単位セメント量 (kg)			w/c (%)			単位細骨材 (kg)			単位粗骨材 (kg)			S/A (%)			
		吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	吹	付	はね返り	
傾胴ゼガーマキサ	I	15.1	140	190	350	411.5		40	46.2		1105	1049		764	687		60	60.4					
	II	15.8	140	130	112	350	338	241	40	38.5	46.7	1054	822	751	860	1127	1320	55	42.2	36.3			
	III	15.1	140	162	131	350	392	297	40	41.4	44.3	959	974	625	955	848	1351	50	53.4	31.6			
	IV	13.8	140	141	174.6	350	284	268	40	49.7		767	746	381	1145	1216	1509	40	38.0	20.1			
	V	10.1	120	189	164	300	343	215	40	55.1	76.2	1306	1395	980	701	400	981	65	77.7	50.0			
	VI	10.0	120	204	108	300	342	197	40	59.6	54.8	1205	1110	734	800	646	1417	60	63.2	34.1			
	VII	11.2	120	158	91	300	323	228	40	51.7	39.9	1105	1052	747	901	814	1388	55	56.4	35.0			
スパイラルミキサ	I	10~15	68	178		171	263		40	67.5		1365	1678		956	273		59	86				
	II	15~20	66	106		164	223		40	43.0		1380	1925		964	223		59	89.6				
	III	15~20	93	212		232	423		40	50.2		1300	1360		902	356		59	79.3				
	IV	10~15	89	186		222	417		40	44.5		1320	1282		913	510		59	71.5				
	V	15~20	109	224		272	426		40	52.6		1240	1215		900	475		59	72.2				

りにより損失となる。

はね返り率——ノズルから噴射した量に対するはね返りによる損失量の比——は吹付機に供給された材料の配合, 骨材の性質, セメント急結剤, 吹付けようとする壁面の傾斜, ノズルマンの技量の程度等に関係する。一般には下向きに吹付ける場合には少なく, 壁面が垂直の場合には約 25%, 上向きに天井に吹付ける場合には 50% 以上となるといわれている。青函トンネルの調査現場ではこの工法を採用した当初, 損失は 50% 以上にもおよんだ。しかし適正な配合の研究とノズルマンの技量の向上とによって, 側壁で 10~15%, アーチで 30~40% に低下し, 最近では側壁アーチを通じて 10~20% と好成绩を収めている。

表-1 は材料別にはね返り率を調べたものである。これによるとセメントと砂とはね返り率はほぼ等しく, 粗骨材のそれは前二者の約 2 倍である。本項の初めに述べたようにコンクリートが付着してゆく過程からいっても, 粗骨材のしかも粒径の大きなものほどはね返り率が高いということは, うなずかれるところである。

(2) 吹付配合と付着配合

前項に述べたように, 吹付コンクリートの作業には必ずはね返りによる損失がともない, 各材料別には粗骨材のはね返り率が特に高い。したがって, ノズルから噴射されたときの配合——吹付配合——と, 壁面に付着したコンクリートの配合——付着配合——とは異なっている。型わく中に打設する普通コンクリートでは, 配合したおりのコンクリートがそのまま固まるのであるから, 問題はない。しかし吹付コンクリートでは, 付着コンクリートが所要の強度を持つように, その配合とは異なる吹付配合を決めなければならないところに, 技術的なむずかしさがある。

表-2 は吹付配合, 付着配合, はね返り配合——はね返りにより損失となった混合物の配合——と, はね返り率とを示したものである。混合にゼガーマキサを使用した分は, 材料の計量を重量によっている。スパイラルミキサを使用した分は, 骨材は坑外のパッチャープラントで計量混合し, セメントおよび急結剤はスパイラルミキサの骨材送り量から使用量を定めた。吹付配合は材料の使用量から単位量を計算したもので, w/c は一率

に 40% と仮定した。付着配合, はね返り配合はともに洗い分析試験によったものである。混合にゼガーミキサを使用した分のはね返り率は重量測定により, スパイラルミキサを使用した分は目測によっている。

表-2 から一般に吹付配合より付着配合の方が富配合となり,  $S/A$  も大となるということがわかる。特にスパイラルミキサで吹付配合が貧配合の場合に, この傾向が顕著である。例外としてゼガーミキサの II, IV があり, それらの吹付配合の  $S/A$  が小さいことが注目される。

吹付配合では水の量がはっきりしていない。それはノズルマンの手加減により変えることができるからである。水の量が少ないとはね返り率が大きくなるから, ノズルマンは水量を多くしたがる傾向にある。 $w/c$  の目標を一応 40%としているが, 付着コンクリートの  $w/c$  は, ゼガーミキサの場合 38.5~59.6%, スパイラルミキサの場合 43.0~67.5% の間にばらついている。

以上の少ないデータからは, どのような吹付配合のコンクリートを吹付けたならば, どのような付着配合のコンクリートが得られるかを知ることにはできない。セメントの種類, 骨材の粒度曲線その他もろもろの因子がこれに関係していることであろうから, 今のところ材料が変わるたびに現場で試験する以外に方法はなからう。ただはね返り率を減らせば減らすほど, 付着配合が吹付配合に近似してくることは確実である。

### (3) はね返り率を少なくする方法

はね返り率を少なくするにはどうしたらよいか。本節(1)で述べたような過程をたどってはね返りが起こるとすれば, 吹付開始に当っては, まず地山の表面に作業継続中には突入した粗骨材の表面に, すみやかにモルタル層が形成されなければならない。このためモルタルはコンテステンシーに富んだもので, セメント使用量が多く, 砂は細粒分の多いものが望ましい。

粗骨材はモルタル層に衝突し, 粒径の何パーセントかに相当する深さだけ突入して初めてそこに留まり得るものであるから, 粒径の大きなものはモルタルの層が厚くなければ付着することができない。粒径の小さなものほど付着する確率は大きいが, したがって, はね返り率は小さい。吹付機材料搬送用パイプの径が 50 mm の場合には, 粗骨材は最大粒径 25 mm のものまで使用できるとされているけれども, 最大粒径を 25 mm とするよりも 20 mm とした方が, また 20 mm とするよりは 15 mm とした方が, はね返り率は減少する。しかし, 最大粒径が大きいほど経済的となるから, その決定はノズルマンの技量とのかね合いになる。

骨材はノズルから噴射される時, 圧縮空気の圧力に

対応して速度  $v$  が与えられ,  $1/2 m v^2$  なる運動エネルギーを得る。ノズルから壁面に到達するまでの時間は短いから, 重力による速度変化は無視してさしつかえない。飛行中の空気抵抗, モルタル中への貫入抵抗に対する仕事量がちょうどこの  $1/2 m v^2$  に見合わなければならない。もし  $1/2 m v^2$  が小さ過ぎれば, 骨材はモルタル中に突入せずに落下するし, 大き過ぎれば突入したのち堅い層で反撥してはね返ってしまう。これを調整するのがノズルマンの技量である。すなわち吹付機の操作員と連絡を密にして, 圧縮空気の圧力を適正に保つこと ( $w$  に関係する), ノズルと壁面との距離を適正に保つこと (空気抵抗に対する仕事量に関係する), ノズルを壁面に垂直に保つこと (骨材の運動エネルギーを最大限に利用する) に努めなければならない。ノズルマンの技量の相違により, はね返り率には大きな差が生ずる。これが吹付コンクリート施工のむずかしさの一つである。

付着コンクリートが厚くなり過ぎると, 自重ではげ落ち, はね返りと同様に損失となる。このためセメント急結剤を添加して, 1 回の吹付厚を大きくする方がとられている。

## 4. 急結剤

吹付コンクリート施工に当っては, セメント急結剤を添加して壁面に付着したコンクリートの凝結を促進し, 壁面からはげ落ちないようにする必要がある。急結剤を添加するとコンクリートの初期強度は大となるが, 最終強度は低下する。また急結剤は非常に高価なので, 急結剤の性質, 添加量の適正範囲等について十分研究する必要がある。

### (1) 急結剤の試験・その 1

吹付コンクリートの試験を開始した当初には, 市販の急結剤は輸入品だけできわめて高価であったので, セメントに急結性を与える数種の薬品について, ペースト, モルタルを対象とし,  $w/c$  や薬品の添加量を変えた場合の凝結までの時間および強度について, 鉄道技術研究所で実験を行ない, 急結剤としての性質を比較検討した<sup>9)</sup>。実験に用いた材料はつぎのとおりである。

セメント: アサノ普通セメント

砂: 川砂 (5 mm 未満砂), 粗粒率=3.71 の気乾砂を用いたその吸水率=1.98

急結剤: イソクレット, シグナイト, 水ガラス粉末, 水ガラス溶液, 重曹, 炭酸ソーダ, 重曹とアルミン酸ソーダ, 炭酸ソーダとアルミン酸ソーダ (アルミン酸ソーダ・溶液のもの比重=1.48, ソーダ分 235 g/l, アルミ

ナ分 180 g/l)

表-3 急結剤の添加量

w/c	種別	急結剤	急結剤量 (C×%)	第一次 固化時間 (約分)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> ) (湿度調整中 養生)
50%	1:2モルタル	重曹	3~5	10	180~140/28
50%	1:2モルタル	炭酸ソーダ	1	2~3	270/28
50%	1:2モルタル	重曹とアルミン酸ソーダ	重1,ア1	6	240/14
50%	1:4モルタル	炭酸ソーダとアルミン酸ソーダ	炭1,ア0.5~1	1~5	220~240/14
50%	1:4モルタル	重曹とアルミン酸ソーダ	重1,ア0.2	5	160/7
60%	1:4モルタル	重曹とアルミン酸ソーダ	重1,ア0.2	15	140/7
60%	1:4モルタル	イソクレット	1~3	6~7	150~160/7
60%	1:4モルタル	シグナイト	3	12	160/7
60%	1:4モルタル	水ガラス水溶液	WG:W 2:8	2	150/7

注：圧縮強度欄 7, 14, 28 は材令 (日) を示す。

まずセメントペーストに各種の急結剤を添加した場合の凝結効果と、供試体の強度についての傾向を検討した。つぎに 1:2 モルタル, 1:4 モルタルについて w/c を変え、各種の急結剤を添加した場合の凝結効果と強度についての傾向を検討した。試験の方法はかくはん槽にセメント, 砂, 急結剤粉末を入れ, 十分に空練りしたのち, これに水 (急結剤としてアルミン酸ソーダ, 水ガラス溶液を用いる場合はこれらを混合したもの) を注ぎ, モルタルミキサで約 20 秒間かきまぜ, 一部は凝結時間の測定に使用し, 残りはただちに φ5×10 cm 型わくに 2 層に入れ, つき棒と木槌とでしめ固める。硬化したらキャッピングを施し, 約 90% の湿度と約 20°C の室温を有する養生室におき, 材令 1 日で脱型し, 湿潤空中養生と水中養生とに分けて保存する。凝結時間の測定は手ざわりにより, モルタルが流動性をなくしたときを第 1 次固化時間, 指で押してもへこまなくなったときを第 2

次硬化時間とした。

実験の結果によれば, 試験をした各種の急結剤は, それぞれ有用なものであることがわかった。また急結性と強度との関連を実験の範囲内で査定し, 適当と思われる急結剤の添加量を表示せば表-3 のとおりである。

## (2) 急結剤の試験・その 2

その後, 国産の急結剤が急速に開発され市販されるようになり, 最近では輸入品と比較してほとんど変わらない結果がでていいる。吉岡建設所では各種急結剤の使用に先立ってセメント凝結試験を行ない, 添加量の適正範囲を検討している。

試験の方法は JIS 標準方法にしたがい, セメントと粉末急結剤 (1~5%×C) との混合物に標準強度を得るに適切な水を加え, 2~3 分間さじで練ってセメントペースト容器に入れ, 凝結始めと終りを測定する。溶液急結剤として, 水ガラスを用いる場合は容積比で 10~40% の範囲で, またクイックウォータイトを用いる場合は, 容積比で 15~30% の範囲で添加した。上記の試験結果から, 凝結開始までの時間が 30~120 秒となる範囲を添加量の適正範囲とすると表-4 のとおりである。

また, 図-1, 2, 3 はハーデックス, イソクレット, 水ガラスの添加量と w/c とを変えて行なった, セメント凝結試験の結果を示す。使用したセメントは, 普通ポルトランドセメントである。実際の吹付作業において, イソクレットの添加量は 3~4%, w/c は 45~55% であるから, これを基準として同じ凝結開始時間を得るためには, ハーデックスを使用する場合は w/c=45~55% で, 添加量は 1.5~2% となり, 水ガラスでは普通セメントを使用したのでは, 同様の効果が得られないことがわか

表-4 急結剤添加量の適正範囲

添加剤	セメントの種類	アサノ 普通ポルトランドセメント	アサノ 早強ポルトランドセメント	富士 高炉セメント (A)	富士 高炉セメント (B)
粉	ハーデックス (日本化学)	適量 3~4% 1% では効果なし 4% 以上も効果上る	適量 3~5% 2% では効果なし 5% まで効果上る	適量 2~5% 5% まででは効果上る 凝結開始と終結の差大	適量 3~5% 2% では効果少ない 5% まででは効果上る
	QP-500 (日曹マスタービルダース)	適量 2% 3% 以上では効果減少	適量 2~3% 4~5% でも大差なし	適量 2% 3% 以上では効果減少	適量 2% 3% 以上では効果大きく減少
	シグニット (D) (海外通商)	適量 3% 4% 以上では効果減少 適量 2~3%	同左 適量 3~4%	同左	同左
末	イソクレット (オーストリア製)	5% でも大差なし	5% でも大差なし		
	MCセメント (国産, イソクレット姉妹品)	適量 2~3% 4% 以上では効果減少	適量 4% 3% 以下では効果なし		
液	クイックウォータイト No. 1	25~30% で効果ある	効果少ない	25~30% で効果大	25~30% で効果ある
	クイックウォータイト No. 2	適量 15~30%	15~30% で効果大	同左	同左
体	珪酸ソーダ (水ガラス 3号)	20~30% 水溶液にして 使用最適 20% 以下では効果なし	同左	同左	同左

図-1 ハーデックスを添加したセメントの凝結試験

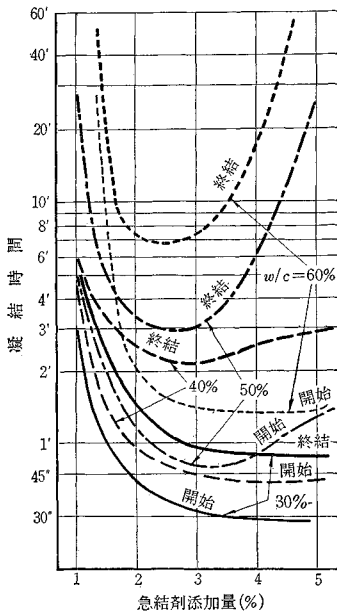


図-2 イソクレットを添加したセメントの凝結試験

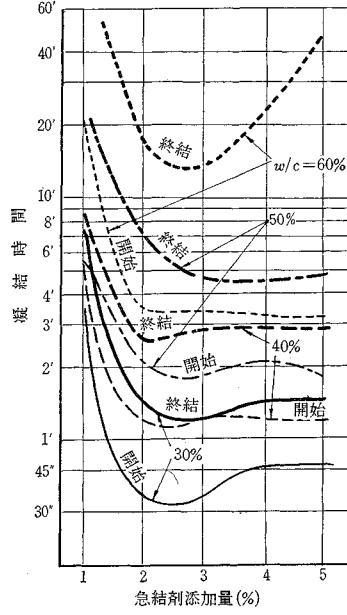
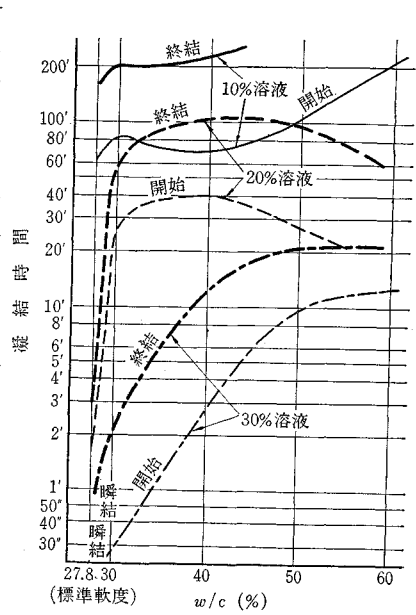


図-3 水ガラス溶液を添加したセメントの凝結試験



る。水ガラスに対しては、早強セメントを使用する必要がある。

(3) 急結剤を添加したモルタルの強度

急結剤がコンクリートの強度におよぼす影響については、付着コンクリートからコアを抜き取って強度試験を行なうのが望ましい。しかし急結剤の添加量を種々に変化させて実施することは困難なので、モルタルによって試験した結果を示すと表-5のとおりである。使用した材料は早強、普通セメント 520 g, 水 338 g, 表乾砂 1 555 g で、フロー値は 200 mm である。成績は材令 7 日の強度を示す。

5. 現場の施工

青函トンネル調査工事では、西ドイツ・トルクレット

表-5 急結剤添加モルタルの強度試験成績

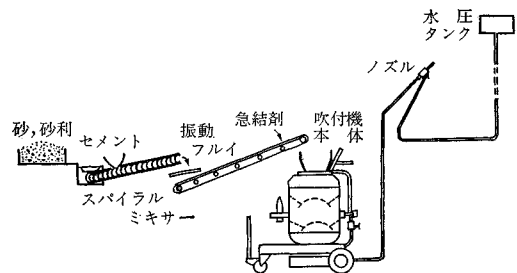
急結剤の種類		イソクレット		ハーデックス		ブレン
		2%	3%	2%	3%	
セメントの種類	添加量					
		2%	3%	2%	3%	
圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ポルトランド通	152.1	120.9	116.7	122.9	125.0
	アサノ強	247.9	183.3	218.8	179.2	237.5
曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ポルトランド通	42.1	28.0	34.4	33.7	42.6
	アサノ強	49.6	43.9	45.2	43.4	63.9

社から S 3-II 型吹付機を購入し、当初は技術修得のため坑外のり面の吹付けなどに試用した。北海道吉岡斜坑では、1965年1月から掘削ずみの区間の側壁に吹付けを開始し、翌年7月末斜坑長 751 m からは鋼アーチ支保工の建込みを止め、掘削直後吹付コンクリートにより1次覆工を完成する工法に切り替え、1967年8月までに付着量にして 3 300 m<sup>3</sup> の吹付コンクリートを施工した。また本州方竜飛斜坑では 1966年5月から練習を開始し、同年12月斜坑長 435 m から鋼アーチ支保工を廃して、吹付コンクリートによる1次覆工を完成する工法に切り替え、1967年8月までに付着量にして 990 m<sup>3</sup> を施工した。

(1) フローシート

図-4 に吉岡斜坑における作業のフローシートを示す。初め砂、砂利は骨材置場に別々に保管し、スパイラ

図-4 フローシート



ル ミキサにより計量した。これはプレートの開きを調節することにより砂砂利の所要量がそれぞれ投入され、ついで骨材の送り量に応じてセメントが投入され、空練りするものである。試験によるとスパイラル ミキサによる計量は、セメント量では ±15% の変動を、絶対細骨材率は 2.2~5.7% の標準偏差を示した。スパイラル ミキサを使用した場合はね返り率と、坑外のバッチャープラントで重量計量しドラム型ミキサで練り混ぜた場合のそれとを比較すると、後者の方が成績がよかった。そこで骨材は坑外で計量し練り混ぜたものを、坑内骨材置場に保管することにした。

空練りされた材料は 振動ふるいを経てベルト コンベヤーに載せられ、粉末急結剤が添加された上で、吹付機上部タンクに投入される。ついで下部タンクに移された材料は、機械底部にある垂直軸のまわりに回転するポケットつきフィード ホイールにより、圧縮空気の流れの中に一定の間隔をおいて一定量ずつ連続的に送り込まれる。垂直軸の回転は 3 HP のエア モーターに駆動される。表-6 に機械の仕様を示す。

材料搬送用パイプに供給された乾燥材料は、ノズルに送られる。その搬送距離は水平に 500 m まで、垂直上昇高さでは 100 m までといわれている。水は送水パイプで送られ、ノズル部分で添加される。材料置場、ミキサ、吹付機など場所をとるものは、はるか後方の余裕のある場所に配置し、吹付施工箇所には 2 本のパイプとノズルを持ち込むだけでよい。このことは掘削のサイクルに入って、切羽で爆破直後に 1 次覆工するために決定的な意義がある。

坑内における吹付関係の作業人員は、号令 1、スキップからの材料おろし 1、骨材投入 1、セメント投入 1、急結剤添加 1、吹付機運転 1、ノズルマン 1、同助手 1

表-6 トルクレット S 3-II 型の仕様

区 分	数 値
1 時間当り作業能力	5 m <sup>3</sup>
材料搬送パイプの径	50 mm
骨材最大粒径	25 mm
圧縮空気所要量	12 m <sup>3</sup> /min
送水パイプの径	17 mm
機械重量	640 kg

表-7 吉岡斜坑における吹付コンクリートの標準配合

材 料	コンクリート 1 m <sup>3</sup> 当り重量
セメント (普通または早強)	230~350 kg
砂 (5 mm 以下)	1180~1070 kg
砕石 (20 mm 以下)	870~960 kg
急結剤 (粉末の場合)	2~4% × C
急結剤 (水ガラスの場合)	20~30% 水溶液
w/c	45~55%

表-8 付着コンクリートの w/c

測定方法	コア採取箇所	コアの箇所	w/c (%)	w/c の平均値 (%)
洗い分析試験	B	13	26.1~47.5	38.6
	斜坑側壁 (162.9~347.9 m)	22	21.7~69.3	43.8
	斜坑側壁 (397.2~499.1 m)	22	23.2~79.4	50.0
乾燥法	B.M 試験法	3	49.0~58.8	53.1
	B	4	51.9~61.5	57.4
	斜坑 535m 付近	5	39.6~55.6	46.4

の計 8 人である。

## (2) 配 合

吉岡斜坑で吹付コンクリートに使用している標準配合は、表-7 のとおりである。

本工法を採用した当初には、作業の不なれから 1 m<sup>3</sup> 当り 300~350 kg のセメントを必要とした。しかし、現在ではゆう水筒所または軟弱地盤の箇所を除けば、アーチでも 1 m<sup>3</sup> 当り 230~250 kg の普通セメントで十分吹付け可能である。普通ポルトランドセメントは各種急結剤とのなじみもよく、付着後の凝結状態もよい。早強セメントは、初期強度の大きなコンクリートを必要とする場合にのみ使用している。

吉岡建設所で吹付コンクリートに用いる骨材の適正粒度を求めるために、S/A=50~65% の範囲で吹付試験を行なった。その結果、最も作業の容易なのは S/A=50~60% であった。砂の表面水は 3~5% が好適である。粉末急結剤を使用する場合、表面水が 7% を越えること、急結剤を添加すると同時に凝結を開始し、吹付機内部に付着し、吐出をさまたげる。吉岡建設所のような寒地では冬期間砂の表面水を好適な状態に管理することは困難がともなう。粗骨材は最大粒径 20 mm の砕石を購入し、理場で再度ふるいにかけて、細長いものおよび扁平なものを取り除いて使用している。現在、骨材によるホースづまりの障害はほとんどない。

セメント急結剤としては、本工法採用の当初オーストリア製のイソクレットをもっぱら使用した。その後国産品も開発され、最近では実際の吹付けにおいて市販の粉末急結剤はどの製品も作業性に大差はない。溶液の急結剤を使用した場合の凝結効果は、粉末急結剤を使用した場合と大差はない。水ガラス溶液を使用する場合は、早強セメントを使用している。

w/c は 45~55% を目標にしている。表-8 は付着コンクリートからコアを抜き取り、w/c を測定したものである。洗い分析試験の結果にかなりのばらつきが見られるのは、水量が分析の最後に出るため計測の誤差が相当入っていると思われる。これに対して乾燥法による測定値はそれほど分散しておらず、吹付コンクリートの w/c

表-9 抜取りコアによる付着コンクリートの配合別試験成績

w/c (%)	S/A (%)	急 結 剤		コアの個数	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	比 重 (湿)	吸 水 率 (%)	弾性波速度 (湿) (m/sec)	動弾性係数 (湿) (10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )
		名 称	添 加 量 (C×%)							
35.7	82.8	イソクレット	1.0	2	199.5		2.31	7.00	3990	38.28
40	36	"	3.0	5	156.9	20.3(2)	2.30	8.64	4050	38.54
40	40	"	3.0	4	184.7	7.2(1)	2.32	7.41	4140	40.53
40	45	"	3.0	5	164.7	13.0(1)	2.35	5.88	4300	44.40
40	50	"	3.0	10	219.2	12.9(2)	2.30	12.21	4270	42.94
40	57	"	2.5	7	167.2	13.3(2)	2.32	10.48	4190	41.50
40	60	"	3.0	100	188.3	16.2(25)	2.30	8.56	4100	39.78
40	65	"	3.0	2	124.0	11.9(1)	2.29	10.95	4200	41.12
40	68.3	"	1.6	5	179.0	23.1(2)	2.36	5.32	4310	44.76
40	75	"	3.0	2	354.0	16.4(1)	2.34	5.51	4310	44.24
43.2	54.3	"	2.0	5	333.7	32.3(2)	2.34	4.81	4480	40.01
43.6	56.7	"	2.2	5	286.7	15.9(1)	2.30	5.60	4410	45.78
50.5	70.1	"	2.7	4	313.5		2.37	4.58	4460	48.04
73.1	75.7	"	3.0	2	129.0		2.28	7.96	3920	35.68
88	67	"	3.0	4	222.5		2.33	6.55	4060	39.07
40	60	水 ガ ラ ス	3.6	4	192.3	16.3(1)	2.31	6.22	4290	43.41
40	60	"	8.0	57	217.2	16.6(18)	2.35	8.03	4150	40.69

注：① コアの採取箇所は吉岡斜坑の側壁である。  
 ② 圧縮試験の村令は 182 日以上、引張試験のそれは 188 日以上である。  
 ③ 引張強度の欄中 ( ) 内の数字はテストピースの個数を示す。

はノズル マンの手加減次第とよくいわれるけれども、一応設計の範囲に収まっていると考えてよい。

ば表-10 の最下欄に示すとおりである。さらに吹付工区間は支保工区間より深度で深いために、ずり積に多く

(3) 抜取りコアの試験成績

表-9 に吉岡斜坑の側壁の付着コンクリートから採取した、抜取りコアの配合別試験成績を示す。

地山とコンクリートとの境はきわめて強固に密着しており、コアを抜取る際にこの境が割れるようなことはなかった。

6. 鋼アーチ支保工との比較

吹付コンクリートによる 1 次覆工が鋼アーチ支保工にとって代るためには、従来の鋼アーチ支保工を建込む時間内に吹付コンクリートによる 1 次覆工の施工が可能であるかどうか、工費の点で両者を比較すればどうか、また岩盤力学の観点から、どちらがよりよい支保方式であるかを検討しなければならない。

(1) サイクル タイムの比較

表-10 に吉岡斜坑、竜飛斜坑における掘削の平均サイクル タイムを示す。吉岡斜坑では吹付関係プラントの配置から、ずり巻上げと吹付材料搬入とが同時にできないために、ずり出作業終了後に吹付作業を行なっている。これに反して、竜飛斜坑では爆破換気後ずり出し作業と併行して、ずり足場の上で吹付作業を行なっている。表-10 に示してあるとおり、1 サイクル当りの平均進行が異なるので、進行 1m 当りの平均所要時分を求めれ

表-10 斜坑掘削平均サイクル タイム

区 分	北海道方吉岡斜坑		本州方竜飛斜坑	
	支保工区間	吹付工区間	支保工区間	吹付工区間
調査対象期間	41.4~41.7	41.8~42.3	41.3~41.11	41.12~42.3
調査対象延長	130m	459m	384m	214m
入 出 坑	26分	(91)分	32分	25分
さ く 岩 準 備	13	34	15	35
さ く 岩	38	47	32	50
さ く 岩 跡 片 づ け	11	13	11	13
装 薬 爆 破	22	30	30	33
換 気	13	9	13	10
ダイナマイト加工運搬		(484)	(265)	
当 り 取 り	7	6(253)	(151)	1(25)
ず り 積	188	286	169	264
線 路 保 守・延 長	6	29	13(8)	(15)
支 保 工 建 込 準 備	14	3	(86)	
支 保 工 建 込	61	4	61	
吹 付 準 備		28(1)		(27)
吹 付		146		3(50)
吹 付 跡 片 付 付		14		5(26)
吹 付 機 故 障		8		5
ず り 積 機 整 備		3(59)	28	18
吹 付 機 整 備		1(9)		
食 事 お よ び 休 憩		26(122)	45	1
材 料 運 搬	24	1(3)	16(7)	1
損 失 そ の 他	13	31(7)	38(8)	14
合 計	436	719	503	478
1 サイクル当り平均進行	1235m	1622m	1172m	1578m
進行 1m 当り平均所要時分	353分	443分	429分	303分

注：① 本表は最上欄に示す期間における全サイクルの平均を示す。  
 ② ( ) 内の数字は他作業との重複時分を示す。

表-11 斜坑 1m 当り支保工または吹付工に要する時分

区 分	北海道方言岡斜坑		本州方竜飛斜坑	
	支保工(分)	吹付工(分)	支保工(分)	吹付工(分)
準備	11	17	(74)	(17)
建込または吹付	49	90	53	2(32)
材料搬入	19	1(2)	13(6)	(1)
跡片付		9		3(16)
損失		5		(12)
計	79	122(2)	66(80)	5(78)
アーチリブ	H 125		H 125	
平均建込間隔 (m)	1.26		1.18	
平均吹付厚 (cm)		17.4		8
平均はね返り率 (%)		17.4		10

注：( ) 内の数字は他作業との重複部分を示す。

の時間を要している。これを支保工区間のずり積時間と同一とおけば、進行 1m 当り平均所要時分は北海道方でそれぞれ 353 分, 418 分, 本州方でそれぞれ 429 分, 279 分となり、吹付工区間の所要時分は支保工区間の北海道方で 118%, 本州方で 65% となる。

表-11 に、斜坑 1m 当り支保工または吹付工に要する時分を示す。これより吹付工に要する時分は支保工に要する時分の北海道方で 154%, 本州方ではわずか 8% に過ぎないことがわかる。

すなわち、もし吹付けとずり出しと平行して作業するならば、1 次覆工のための所要時分はごくわずかなもので、掘削のサイクルタイムもほぼ 1/3 に減ずることができる。

## (2) 工費の比較

表-12 は、調査斜坑を支保工区間と吹付工区間とに分けて、それぞれの工費の比較を示したものである。ここに掲げた数値は、掘削開始当初から昭和 42 年 3 月までの、斜坑掘削に関する直接費の総平均である。掘削の工費が支保工区間より吹付工区間の方が高額となっているのは、斜坑深度が深いためである。北海道方の吹付工の工費は、支保工工費の 68%, 本州方のそれは 41% で支保工より吹付工の方がはるかに経済的であるといえる。このため、掘削の工費が高額であるにもかかわらず、全体の工費は吹付工区間の方が低廉となっている。

表-12 に示す金額は斜坑 1m 当りの金額で、北海道方と本州方とでは斜坑の断面積、吹付厚、はね返り率とも多少の相違がある(表-11 参照)。したがって、掘さく、吹付工について両者をただちに比較することはできない。この比較を容易にするために、表-13 に付着コンクリート 1m<sup>3</sup> 当りの工費を示す。本州方の工費が非常に高いのは、調査対象期間が 1966 年の冬季に当り、たまたま未曾有の豪雪に見舞われ、諸資材の入手が困難

表-12 斜坑掘削 1m 当り工費

(単位：円)

区 分	北海道方言岡斜坑		本州方竜飛斜坑		
	支保工区間	吹付工区間	支保工区間	吹付工区間	
掘	労務費	12 715	17 797	10 135	14 740
	火業費	6 251	5 446	8 664	8 103
	燃料および油脂	583	661	664	655
	ロット・ビット類	1 986	372	636	168
	その他	2 815	3 172	2 712	6 460
	計	24 350	27 448	22 811	30 126
支	労務費	4 523		4 209	
	支保工	17 552		18 786	
	矢板	12 107		11 841	
	内ばり	3 088		4 357	
	パンキン	1 144		1 772	
	その他	163		87	
計	38 577		41 598		
吹	労務費		6 026		1 724
	セメント		9 704		1 776
	骨材		7 395		5 663
	急結剤		5 160		2 471
	トルクレット部品		774		799
	耐圧ホース		1 279		2 095
その他		995		758	
計		26 333		15 286	
合 計	62 927	53 781	64 409	45 412	

となり、物価が高騰したためである。ちなみに骨材の単価を示せば、表-13 下欄のとおりである。

以上は掘削関係の直接費について、鋼アーチ支保工を用いた場合と吹付コンクリートによる 1 次覆工を採用した場合との工費を比較したもので、後者の方がはるかに経済的であることがわかった。さらに比較の範囲を覆工コンクリートにまで広げて考えるならば、後者はいっそう有利となる。それは、いわゆる余掘りに相当する部分がすでに吹付コンクリートにより埋められており、2 次覆工に要するコンクリート量が、鋼アーチ支保工を使用する場合にくらべ、はるかに少なくなるからである。

また鋼アーチ支保工を使用したときは、覆工背面に空げきが残るので、コンタクトグラウトを施工するのが望ましい。この場合、多量のグラウトが必要であり、そ

表-13 付着コンクリート 1m<sup>3</sup> 当りの工費

区 分	北海道方言岡斜坑 (円)	本州方竜飛斜坑 (円)
労務費	2 661	2 000
セメント	2 077	2 060
骨材	3 265	6 569
急結剤	2 279	2 866
トルクレット部品	342	927
耐圧ホース	565	2 430
その他	439	879
合 計	11 628	17 731

参考：骨材の単価

砂 (円/m <sup>3</sup> )	1 709	3 162
砂利 (円/m <sup>3</sup> )	1 776	5 031



の工費は相当高額なものとなる。これに反して、吹付コンクリートによる1次覆工を採用した場合は、完全に地山と密着しているし、1次覆工と2次覆工との接触はアーチクラウンにわずかな空げきが残るだけである。したがって、コンタクトグラウトもごく少量で済ますことができ、この点からもより経済的となる。

### (3) 支保性能の比較

最後に残された問題は、岩盤力学の見地に立って、鋼アーチ支保工と吹付コンクリートによる1次覆工との優劣を比較することである。われわれはトンネルを掘進した場合、掘削により新たに生じた坑壁をなんらかの方法で支保し、掘削により得た空洞空間を確保しなければならぬ。その支保の方法に要求される条件は、

- ① 掘削された地山がそれ自身のアーチ作用、ドーム作用により自立している時間内に、支保が完了すること、
- ② 支保工はそれ自身可撓性のものであっても、地山との相互拘束作用により剛性を持つようになり、地山をゆるませないようにすること、

である。

第一の条件は、従来の鋼アーチ支保工を例にとりていえば、地山の自立時間が掘削の1サイクル以下であれば縫地工法を必要とし、1サイクル以下であれば掛矢板工法、数日であれば後普請、数箇月以上ならば無普請となる。すなわち、鋼アーチ支保工は、地質条件のすべての領域に適用することができる。これに反して吹付コンクリートによる1次覆工は、縫地工法に相当する地山に対して単独で適用することはできない。この場合には鋼アーチ支保工を建込んで、鉄矢板または鉄筋コンクリート矢板で縫い、矢板裏を吹付コンクリートででん充し、さらに内面全体にコンクリートを吹付けて、矢先を除いて矢板がたわまないようにする。掛矢板工法、後普請に相当する地山に対しては、吹付コンクリート単独で完全に従来の支保工にとってかわることができる。

第二の条件について鋼アーチ支保工を検討して見ると鋼アーチリブそのものは非常に可撓性に富んでいる。しかし、これを建込んで地山との間にくさびをきかせると、地山との相互拘束によって剛性を生じ、くさびに接する部分の地山をゆるませないようにする。くさびをしめ忘れたり、あるいは、リブの底盤がなんらかの原因により沈下もしくは移動すると、拘束力が解けて剛性を失なう。剛性を失なうと地山にゆるみを与え、アーチリブに作用する荷重が増大する結果となる。この荷重増大はリブ底盤の第二の沈下移動の原因となるほか、アーチリブ面に直角方向の拘束力はきわめて弱いので、面外座屈の原因となる。またリブの間に掛け渡した矢板は、はだ

落した岩片が落下するのを防止する程度のものであって、地山を拘束してゆるみを与えないことまでを期待するのは無理である。すなわち、鋼アーチ支保工は地山と点(くさび)で接触し、地山がアーチリブ面内にゆるまねように拘束しているにすぎず、この拘束もきわめて解けやすい状態にある。

これに反して、吹付コンクリートによる1次覆工は、掘削により新たに現われたまだゆるんでいない坑壁にきわめて強固に密着し、地山と面で相互に拘束し合っている。いな、むしろ地山と一体になって剛性を保持している。すなわち、吹付コンクリートによる1次覆工は、5~10 cm 厚の薄いコンクリート構造物として存在するのではなく、これと密着する地山岩石と協同して、それより奥の地山をゆるめないように支保する最も理想的なトンネルの支保方式である、この場合、掘削により不規則に生じたくぼみを吹付コンクリートによりでん充し、平滑なアーチ面を形成することに、岩盤力学上とくに重要な意味がある。

鋼アーチ支保工よりも吹付コンクリートによる1次覆工の方が地山をゆるめないであろうということは、上に述べたことから理解されよう。最近、弾性波速度の研究等により掘削直後に施工された吹付コンクリートは、内部の地山を1次応力状態に近い状態で支保していることが、定量的に測定されつつある。

## 7. む す び

吹付コンクリートにより爆破直後に1次覆工を完成することは、初め技術上経済上種々の問題があったけれども、以上述べたように一つ一つこれを解決して十分実行可能な工法となった。しかも、空洞空間を支保する性能は、従来の鋼アーチ支保工にくらべて、はるかにすぐれており、あらゆる地質条件に適用することができる。強度の地圧が作用する蛇紋岩地帯に適用して成功した例として、紅葉山線新登川トンネルの試験がある。ただゆう水区間に対しては、ゆう水を処理せずに本工法を適用することはできない。わが国のトンネルでゆう水のないトンネルはほとんどないから、本工法の利点を完全に発揮させるためには、ゆう水区間に対しても本工法を容易に適用できるよう鋭意研究する必要がある。

### 参 考 文 献

- 1) 粕谷逸男：吹付コンクリートと水を通さない覆工、鉄道土木、1962.10
- 2) 粕谷逸男：仮巻きとしての吹付けコンクリート、日本国有鉄道第30回土木工事施工研究会記録、1963.3
- 3) 樋口芳朗ほか：建設工事における吹付工法の応用(Ⅱ)、鉄道技術研究所速報、1965.6

(1967.10.13・受付)