山岳トンネルの施工法の技術革新における吹付けコンクリートの工学的意義

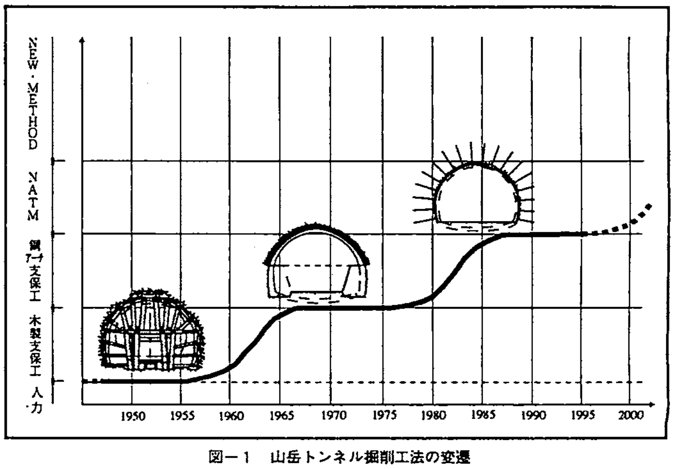
氏　　　名	寺　本　勝　三
生 年 月 日	
本　　　籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第240号
学位授与の日付	平成13年9月28日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	山岳トンネルの施工法の技術革新における吹付けコンクリートの工学的意義
論文審査委員(主査)	川村　満紀(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	鳥居　和之(工学部・教授)　前川　幸次(工学部・教授) 五十嵐心一(工学部・助教授) 太田　秀樹(東京工業大学大学院理工学研究科・教授)

学位論文要旨

It is the main stream of today's design/construction method for the hard rock tunneling in Japan to use the NATM supporting system such as shotcrete, rock bolts, steel ribs and/or their combinations. The process of changing to the NATM supporting era is evaluated as the result of the technical innovation, with consideration to the engineering significance of wooden supports and steel arch ribs which were formerly used. The result of this innovation was firstly the trigger of the mechanization of tunnel construction, which was enabled by the increased supporting capacity using steel arch ribs, of which the strength was excellently high. The result secondarily evolved the mechanization of hard rock tunneling significantly, because the friction supporting mechanism of shotcrete rationalized the tunnel excavation sequences, also the NATM supporting structures had more supporting capacity. The shotcrete aims at giving the supporting structure for the NATM, and the technical innovation in the hard rock tunneling method. A new design method is proposed, and a new material and construction method are also researched and developed in this paper. In addition, a measurement method of the strength of shotcrete at young ages, which is important to shotcrete, is proposed. Then, some proposals for a new construction method are described.

我が国の山岳トンネルの施工技術は長年に亘って人力掘削と木製支保工即ち木製丸太材と矢板材による空洞保持支保構造によるものであった。しかるに、1960年代に入り、鋼材（古レール、Ｉ型鋼、Ｙ型鋼、Ｈ型鋼など）を用いた坑道枠やアーチ支保工が出現し、施工法の革新がもたらされた。更におよそ20年を経て、鋼アーチ支保工に代わって、吹付けコンクリートやロックボルトを主体的に用いる支保工の出現で所謂ＮＡＴＭ（New Austrian Tunnelling Method）時代に入り、施工法の技術革新は飛躍的なものとなった。（図ー１）

これらの山岳トンネルの技術革新たる具体的な施工形態の変化は、人力掘削から機械化施工への変遷である。この技術革新によって我が国の山岳トンネルの施工に高速・大容量施工と、それに伴なう飛躍的コストダウン、投資効果がもたらされた。更には工事安全環境の改善面においても、新たな不安全形態、例えば大型機械との接触などの危険要素の出現も見られるが、総じて顕著な成果が得られるようになった。



図ー１　山岳トンネル掘削工法の変遷

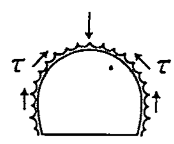
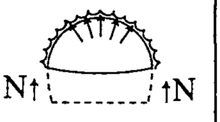
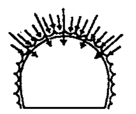
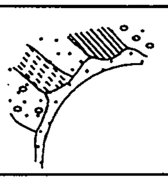
これらの成果がもたらされた技術革新の要素は、支保構造の飛躍的強度増による掘削断面積（空洞）の増大と支保機構の改善による掘削手順の段階の省略による合理化である。掘削手順の段階の省略とは以下のことをさしている。木製支保工又は鋼アーチ支保工の安定が支保工下端支持力の確保によって保持されるのに対して、ＮＡＴＭにおける支保の３要素である吹付けコンクリート、ロックボルト及び鋼アーチ支保工が基本的にその支保機構を支保工下端支持力に依存しない。そのため掘削手順として加背を上部から下部へと切広げる際、上部空洞を保持している支保構造（先行構築した覆工を含める）の下端支持機構を維持するための施工上の手順（逆巻き工法）を必要としないということである。

こうした技術革新の成果は、我が国の山岳トンネルの施工形態を人力から機械化に移行させ、更には運搬方式として、軌条方式からタイヤ方式に移行することによって、トンネル施工に汎用機械の適用を可能ならしめるに至った。

こうしたＮＡＴＭ支保工の卓越した支保能力はＮＡＴＭ支保工のもっとも主体的な要素である吹付けコンクリートの作用効果に依存している。吹付けコンクリートの作用効果について、トンネル標準示方書（山岳工法編）は表－１を示している。この表に示す作用効果をもたらす吹付けコンクリートの特性として共通するものは、吹付けコンクリートが地山などの吹付け面に付着力を発揮して密着していると言うことである。言い換えれば、吹付けコンクリートに求められる強度要素としては、単にコンクリートとしての圧縮強度やせん断強度だけではなく、付着力（場合によっては引張強度も）が必要となる。そして、ＮＡＴＭの工法理念としては吹付けコンクリートが全周にわたって付着強度を持って付着していることを前提としているものであるが、その吹付けコンクリートを１次覆工として捉えた時の設計法は、従来より全周付着を前提としない折れ線近似梁モデルで解析してきた。これに対して、全周付着を前提とした付着モデルで解析すると、全く異なる断面力を呈することになり、従来の吹付けコンクリートに対する考え方を大幅に変える必要があることを示す。即ち、設計に於いても施工においても付着を重視した工学的要件を満たす必要があり、又それがＮＡＴＭの工学理念を活かすことになる。

一方、これまでのＮＡＴＭによるトンネル施工の実績が、吹付けコンクリートの持つ極めて高い支保機能を立証してきているが、その一方で、多量のリバウンドと粉塵を発生させるということで、施工ロスに対する辟易感と作業環境の劣悪さに対する嫌悪感を吹付けコンクリートに関して持たれてきていることも紛れも無い事実である。また、計測によって支保工としての機能状況を把握

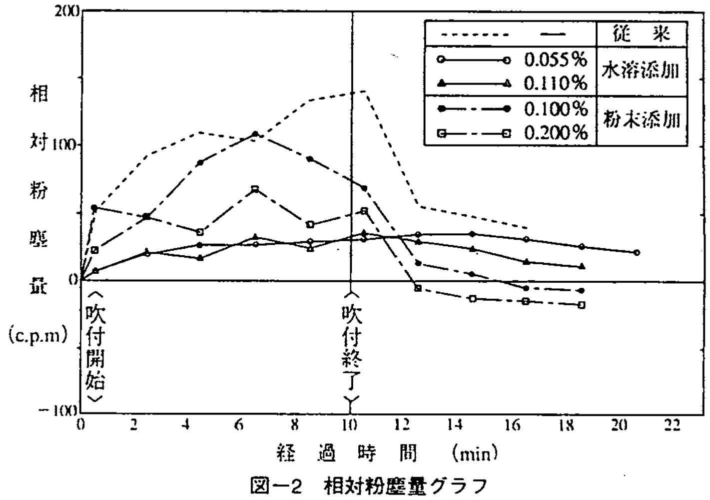
表－1　吹付けコンクリートの作用効果

吹付けコンクリートの作用効果	概　念　図
1　岩盤との付着力，せん断抵抗による支保効果 吹付けコンクリートと岩盤との付着力により，吹付けコンクリートに作用する外力を地山に分散させ，またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え，キーブロックを保持して抜け落ちを防止し，グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成させる。割れ目の多い硬岩等に作用効果が大きい。	
2　内圧効果，リング閉合効果 比較的厚い吹付けコンクリートが連続した1個の部材として地山を支持することにより，地山の変形を拘束して地山に支保力（内圧）を与え，地山を三軸応力状態に近い状態に保持して，地山の応力解放を抑制する。また，早期にインバートを敷設して断面を仮閉合することにより，支保効果がさらに発揮される。これらの効果は，軟岩や土砂地山等で大きい。	
3　外力の配分効果 鋼製支保工，あるいはロックボルトに土圧を伝達する部材として挙動する。	
4　弱層の補強効果 地山の凹みを埋め，弱層をまたいで接着することにより，応力集中を防ぎ弱層を補強する効果。	
5　被覆効果 掘削後，早期に壁面を被覆するため，周辺地山の風化防止，止水，微粒子の流出防止等の効果がある。	

トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説より

し得ることが、ＮＡＴＭ工法の優れた要素であると同時に、高度で煩雑な計測技術が要求されると言う問題も存在する。吹付けコンクリートに関わるこの問題点を具体的に言えば、若材齢時の発現強度の検証である。そこでこれらの問題点を解決するための新工法や新手法を試みた。

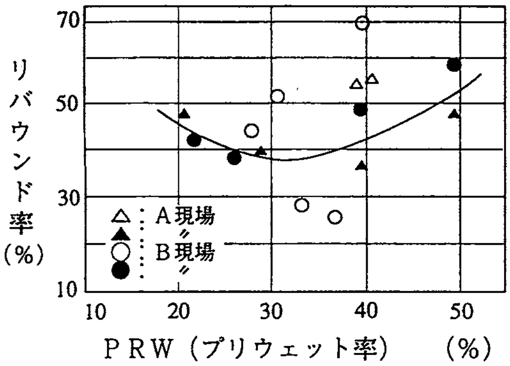
第１に、吹付けコンクリートの粉塵発生を抑制する粉塵抑制剤の効果の検証である。これは市販に供されている代表的な粉塵抑制剤に関して現場実証テストを行い、適用性を追及した。結果、抑制剤の選択と使用方法が適切であれば十分効果を発揮せしめることが出来ることが解った。しかしその一方で、これまで粉塵とリバウンドの発生機構が同一で、両者の発生量は比例関係にあると見なされていたのであるが、この実験で、粉塵抑制剤の添加によって発塵を低減しても、必ずしもリバウンドの低減に繋がらない結果も見られ、粉塵とリバウンドの発生機構について見方を変える必要があることが解った。（図－２）



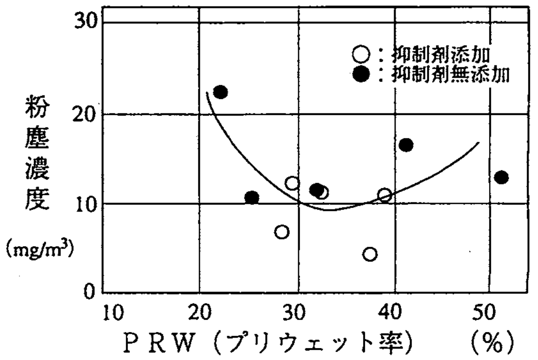
図－2　相対粉塵量グラフ

第２は、プレミックスド・コンクリートを用いた吹付け工法の開発である。本工法はあらかじめ工場で製造した絶乾状態の骨材とセメントの混合材を袋詰めにして現場に持ち込み、現場ではこれ

に混錬水を加えるだけで吹付けることが出来るようにした工法である。ただ、単順にドライ混合材に水を加えるだけでは、極めて多大な発塵とリバウンドを発生させるので、混合材を吹付け機に投入する前に混錬水の１部を添加して練り混ぜるプリウェットミキサーを考案して使用した。その結果、粉塵とリバウンドを低減せしめ、かつ、良質な吹付けコンクリートを得ることが出来た。



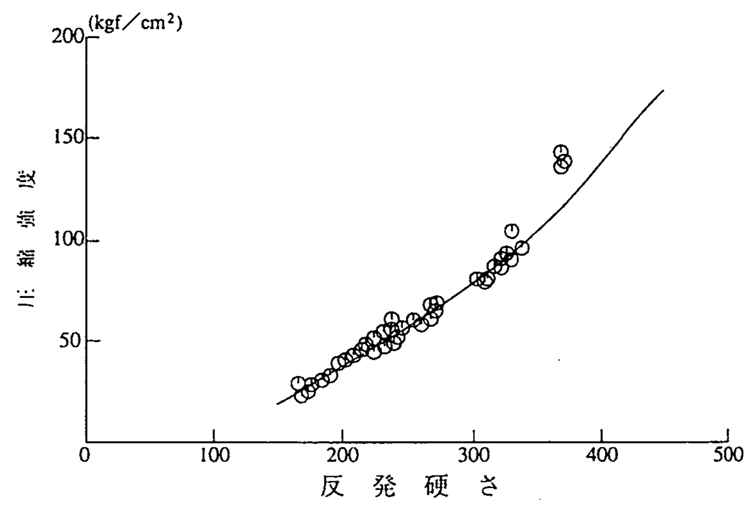
図－３　プリウェット率とリバウンド率の関係



図－４　プリウェット率と粉塵濃度の関係

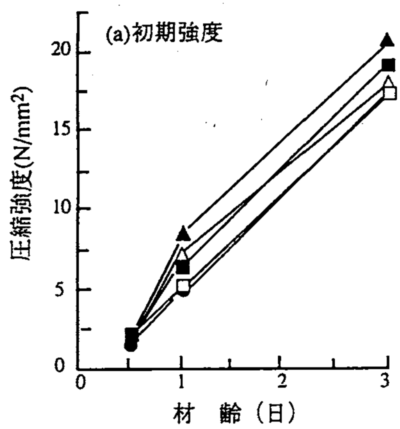
尚、試験施工でプリウェットが骨材表面水率でおよそ５％相当が発塵及びリバウンドを最小限にする事が解った。（図－３、図－４）

第３は、コンクリートの若材齢強度の非破壊試験方法である。従来の若材齢強度試験法は破壊試験でありながら換算による推定方法であるプルアウト試験法か又は低強度用シュミット・ハンマーを用いた方法である。これらの方法は、破壊試験法であるために予め試験用供試体を吹付けて置くといった煩雑さや、最も知りたい５MPa以下の強度領域の測定が不可能である等の問題点がある。そこで、間接的強度推定方式であるが現位置非破壊試験方法である、ペーパーロールの巻き取り固さを測定するパロ・テスターに金属固さを測定する電子エコーチップを組み合わせた試験機の適用を開発した。本試験法によれば、５MPa以下の若材齢強度の測定において、パロテスターの反発硬さと圧縮強度との間に高い相関性が見られ、測定可能であることが解った。（図－５）

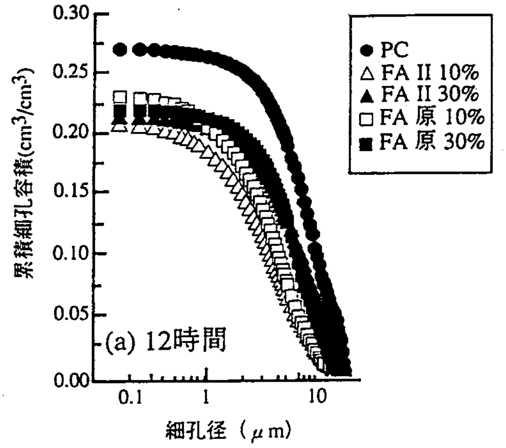


図－５　反発硬さ（L）と圧縮強度の関係（パロテスター）

第４は、フライアッシュ原粉を吹付けコンクリートの細骨材の１部に置き換えて利用する技術の可能性を確認する研究である。フライアッシュは石炭火力発電からの産業副産物として大量に産出している。従来フライアッシュはコンクリートの水和反応熱の上昇を抑制しながら長期においてはそれが持つポゾラン反応性を利して強度の確保に寄与させるセメント置き換え材として利用されてきた。しかしセメント代替材として利用するにはJIS規格に合致させるべく分級精製しなければならないため、コスト面での合理性が得難くなってきている。一方大量に産出するフライアッシュの大量利用の道が無ければ、これが膨大な産業廃棄物となり、石炭火力発電の負の付加価値にもなっていることも事実である。そこで、現在次第に入手困難になりつつある吹付けコンクリート用細骨材の代替材としての利用が着目されている。研究ではフライアッシュ含有コンクリートの初期強度と細孔構造について進め、その結果、①フライアッシュ高含有コンクリートは初期強度の発現性に優



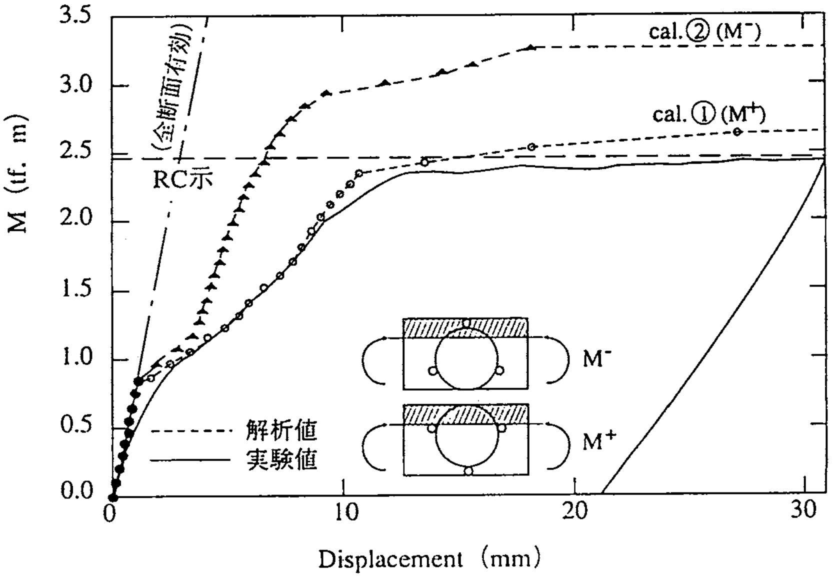
図－６　フライアッシュコンクリートの初期強度



図－７　細孔径分布

れている、②フライアッシュの水和反応促進効果は認められないが、フライアッシュの充填効果による実質的なポロシティーの低減が初期強度の増大に寄与している、③フライアッシュ含有コンクリートへの急結剤の使用は初期強度の発現に有効であるが、同一毛管空隙率のモルタル強度は低下している、などが解った。この結果フライアッシュ原粉の吹付けコンクリートへの利用は有望であり、また、その付加価値を高める新しいタイプの急結剤の開発が期待されることが解った。（図－6、図－7）

第５は、鉄筋支保工による吹付けコンクリート補強法の研究である。ＮＡＴＭでは吹付けコンクリート、ロックボルト及び鋼アーチ支保工を支保の３要素としているが、そのうち鋼アーチ支保工は付加的補強材とも言われ、吹付けコンクリートライニングの補強材としての役割で設計・施工されることが多い。その場合H型鋼のように初めから曲げ剛性が高く、取扱上も重量の大きいものより、軽量で、結果的に吹付けコンクリートの補強となるトラス型の支保工材の提案があり、ドイツなどに製品もある。そこで新しく螺旋形状の鉄筋をラチス材とすることによって吹付け厚さに応じて桁高を可変とし、かつより軽量な螺旋状組立筋支保工を開発した。本開発品の実物大モデルで曲げ実験等を行った結果、この支保工は期待した補強効果を発揮し、かつ妥当な設計値を得ることが出来ることが解った。（図－8）



図－８　モーメント－たわみ曲線

学位論文審査結果の要旨

平成13年8月1日に第1回審査委員会を開催し，面接審査を行った。さらに，8月8日に行われた口頭発表の後に開催された第2回審査委員会において協議をした結果，以下のように判定した。

本論文は，まずトンネル施工法のNATMにおいて吹付けコンクリートが支保工としての効果を発揮するためには，コンクリートが岩盤に付着していることが重要であるとして，解析のための構造モデルを構築し，この付着の重要性の解析による検証を試みた。その結果，付着モデルにおいては，発生する曲げモーメントが極めて小さくなることよりこの考え方の妥当性が証明されている。さらに，吹付けコンクリートの施工および品質管理において必要となる初期材齢におけるコンクリートの強度の推定および産業廃棄物の有効利用という観点からの多量のフライアッシュを含有する吹付けコンクリートの製造の可能性について検討している。前者については，非破壊試験法の1つとして独自に開発した電子式ペーパーロール硬さ試験機の低いコンクリートの強度（約2.5N/mm^2以上）の推定に適用が可能であることを示し，後者については，反射電子像の画像解析によって，多量のフライアッシュを混入することが，初期におけるセメントの水和反応に影響を及ぼさないことを明らかにしている。

以上の研究成果は，トンネル施工法のNATMにおける吹付けコンクリートの力学的意義を明確にするとともに，吹付けコンクリート材料に関連する新しい知見を得ている点において，トンネル施工技術の発展に大きく貢献するものであり，博士論文として価値あるものと判断した