

小特集：世界の中の我が国の技術

我が国の舗装・トンネル技術

久保和幸* 角湯克典**

1. はじめに

排水性舗装の普及や困難な地質条件下での大断面トンネルの施工など舗装・トンネル分野において我が国の技術が世界的に注目され、土木研究所においても従来の発展途上国のみならずドイツ、オランダなどの先進国からの視察団を受け入れる機会も多くなってきている。

ここでは、世界の舗装技術の中で我が国の技術がどのような位置付けにあるのかを整理するとともに、世界に向けて情報発信するにふさわしい最先端のトンネル技術について紹介する。

2. 舗装技術の比較

舗装技術については、我が国の舗装の95%を占めるアスファルト舗装について記述する。

2.1 構造設計法

我が国のアスファルト舗装の構造設計法は大きく分けると過去の供用実績などに基づく経験的設計手法であるT_A法と、図-1に示すように舗装構造を層状に弾性材料が重なりあった集合体とみなし、舗装内に発生する応力から構造解析を行う多層弾性理論などの理論設計法がある。

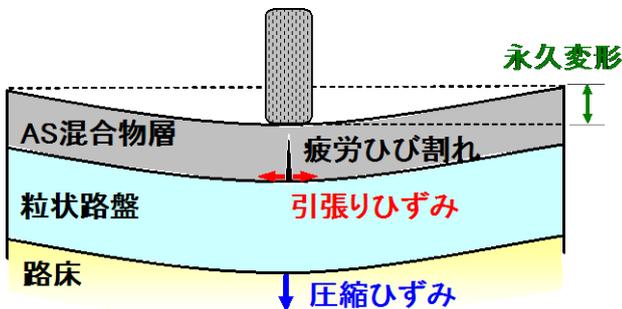


図-1 多層弾性理論の概念図

我が国の舗装工事においては、特殊な材料を用いる場合を除き、T_A法で構造設計される場合がほとんどであり、こうした経験に基づく設計法は

ドイツやイギリスにおいても主流となっている。例えば日本とドイツ³⁾を比較すると、日本が大型車交通量と路床の支持力(CBR)によりアスファルト舗装断面を設定するのに対し、ドイツでは路床の支持力を一定値以上で規定した上で、車線数や車線幅といった交通条件をより細かく反映できるようになっている。こうした路床・路盤の性能評価・設計という点では欧米の方が日本より進んでいる印象がある。

表-1に我が国と、イギリスならびにドイツにおいて交通条件などを同一条件にした場合の舗装断面の設計例を示す。各層の厚さに多少の差はあるが、おおよそ同じような断面になることが分かる。我が国において、構造設計、特に路盤・路床などの研究が欧米ほど進んでいない背景としては、結果としてこのようにほぼ同じ断面となり、耐久性の面からも十分設計交通量に耐えているのだからあまり深く研究しなくてもよいのではないかと、という風潮も一因として挙げられるかもしれない。

表-1 アスファルト舗装の断面の比較例

	日本 ¹⁾	イギリス ²⁾	ドイツ ³⁾
設計期間	道路管理者が適宜設定(従来は10年)	20年	20年
表層・基層の厚さ	15cm	10cm	12cm
路盤の厚さ	As安定処理 10cm 粒状材料 62cm	As安定処理 26cm 粒状材料 50cm	As安定処理 22cm 凍結防止層 46cm
合計	87cm	86cm	76cm

2.2 施工技術

アスファルト舗装の基本的な施工工程は

- ①アスファルト混合物の製造・運搬
- ②アスファルト混合物の敷均し
- ③アスファルト混合物の締固め

であり、これは全世界共通である。

①については、ヨーロッパにおいてはアスファルト乳剤を用いることにより加熱しない常温型のアスファルト混合物を使用する場合もあるが、我が国においてはほとんどの場合、製造時にアス

ファルトを加熱する。これは、我が国において過去の常温型舗装の破損事例により、加熱アスファルト混合物を強く推奨してきたことにも起因する。

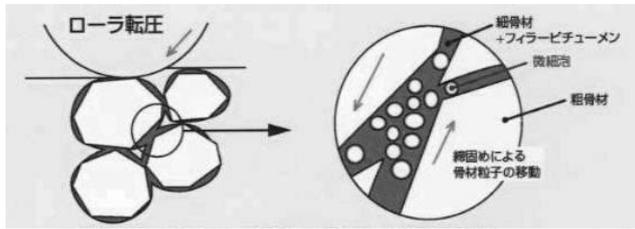


図-2 中温化技術の概念

近年では、アスファルト混合物の製造過程での二酸化炭素排出量を低減させる中温化技術も注目されている。これは、アスファルトと碎石を混合する際に必要となるアスファルトの軟化を、加熱ではなくベアリングの働きをする添加剤により行おうというものである。これにより、従来の160℃程度の混合温度が100℃程度に下げることができ、アスファルトプラントでの二酸化炭素排出量が10%低減できると試算されている。

②および③の工程においては、熟練オペレータが今後不足してくるであろう、という観点から、IT技術を導入した情報化施工技術が日欧米で試行されている⁴⁾。GPSによりモーターグレーダの位置を3次元で計測し、土砂の敷きならし高さを自動制御する技術の概念図を図-3に示す。情報化施工については、世界各国で技術開発が進められており、土木研究所先端技術チームが情報交換のための基盤構築に向けた研究に取り組むなど、我が国も主導的な立場で参画している⁵⁾。



図-3 GPSによるモーターグレーダの自動制御

2.3 新技術開発

(1)排水性舗装

我が国において、近年普及が進んだ舗装技術としては排水性舗装が挙げられる。排水性舗装の効

果としては

①都市部における道路交通騒音の低減

②雨天時における車両の走行安全性の向上の2つがあり、①の効果を期待して、都市部の直轄国道ではほとんど排水性舗装に打ち換えられている。また、高速道路においては②の効果を期待して全線のうち5割以上は排水性舗装となっている。

排水性舗装のような空隙率の高い舗装技術はもともとアメリカにおいてOGFC(Open Graded Frinction Course)として開発されたが、我が国に導入するにあたり、都市部での交通量の多さなどを考慮して、舗装の耐久性を向上させるため接着剤であるアスファルトバインダーの品質が飛躍的に向上することとなった。排水性舗装に関しては、その普及状況とアスファルトの性能は海外と比較しても最前線にあると言え、加えて、普及から既に10年以上を経過しているために、排水性舗装に用いられているアスファルト混合物の再生利用に関しても、海外と比較して多くの知見を有していると言える。17年度には再生に関してデンマーク・オランダから土木研究所に調査団が来所しており、また参加した国際会議の場でも排水性舗装のリサイクルについて意見を聞かれることは多い。

(2) その他の新技術

最近我が国では、以下に示すように環境改善に関連する技術開発が数多く行われている。

○地球環境に関するもの

中温化技術 (CO₂排出量の削減)

○都市環境に関するもの

温度低減舗装 (ヒートアイランド対策)

透水性舗装 (都市型洪水の抑制)

他産業リサイクル材の活用

○沿道環境に関するもの

低騒音舗装 (多孔質弾性舗装など)

低振動舗装

これらの技術のうち、中温化技術については、欧米においても関心が高く、技術開発が進められている。一方、図-4に示す温度低減舗装技術は、土木研究所が国際会議にはじめて発表したのは平成17年であり、発表時点での聴講者の関心は高かった。しかしながら、それ以降に参加した国際会議でも他国から同技術に関する発表は未だない。

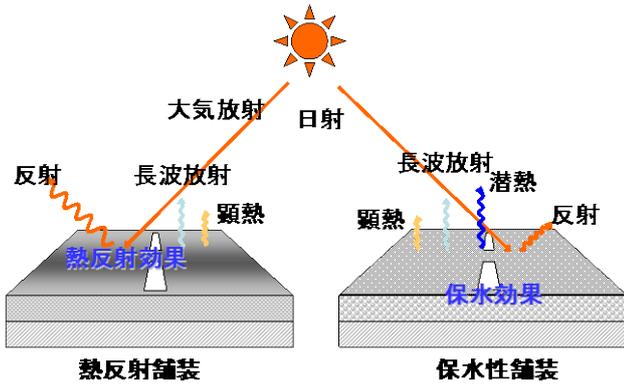


図-4 温度低減舗装の概念図

こうした技術開発が欧米において我が国ほど進んでいない背景としては、舗装の基本的な性能は耐久性である、という認識があると推測される。事実、我が国においてこれほど普及が進んだ排水性舗装についても、舗装の中に水を入れることは耐久性の低下につながるとして、否定的な見解を示す欧米の技術者も少なくない。

3. 世界におけるわが国のトンネル技術

トンネル技術については、トンネル建設工法の内、山岳トンネル工法とシールドトンネル工法について述べる。

3.1 山岳トンネル工法⁶⁾

吹付けコンクリート・ロックボルト等により地山を支持してトンネルを建設する山岳トンネル工法は、わが国においては山岳部のトンネルの主要な建設法としてのみならず、都市部の土砂地山等においてもその適用が図られてきた。欧州においても山岳トンネル工法は、北欧の中硬岩・硬岩地山地域からイタリア等の軟岩土砂地山地域まで広く適用されている。一口に山岳トンネル工法と言っても、中硬岩・硬岩地山を対象とする場合と軟岩・土砂地山を対象とする場合とではトンネル

の構造が大きく異なる。わが国は地質の多様性に富んでいることから、その両者を対象としたトンネル施工技術を有しているのは一つの大きな特徴として挙げられよう。

(1)中硬岩・硬岩地山を対象とした山岳トンネル工法

北欧の中硬岩・硬岩地山を対象とした山岳トンネル工法とわが国のそれを比較したものを表-2に示す。NMT(Norwegian Method of Tunneling : ノルウェートンネル工法)は割れ目や余掘りが問題となる亀裂性岩盤において、トンネル掘削の安全性と経済性向上を目的に開発されたものであり、一軸圧縮強度5Mpa～250Mpa程度の地山を対象に適用されてきた。この工法とわが国の中硬岩・硬岩を対象とした山岳トンネル工法が異なる点は、1)支保工（鋼繊維補強吹付けコンクリート、ロックボルトなど）を永久支保工として施工し、2)覆工コンクリートを施工しないシングルシェルが多く採用されていることや、3)余掘りの多くなる硬岩地山を対象とすることからロックボルトが適用され鋼製支保工が適用されないことなどである。また、北欧では掘削はおもに4～5mの長孔発破が採用され、標準的な2車線道路トンネル断面でも90～100m/週の進行は珍しくなく、わが国のそれと比較すると約3～4倍以上の進行を誇っており、効率的な掘削を実現している。

(2)軟岩・土砂地山を対象とした山岳トンネル工法

近年わが国においても都市部をはじめとする土砂地山に山岳トンネル工法が適用され、十分に施工実績を蓄積しつつあるが、欧州でもイタリアやドイツをはじめとして軟岩・土砂地山を対象とした各国独自の施工技術が発達してきた。特にイタリアでは、都市部の土砂地山や山岳部の押ししが

表-2 わが国の中硬岩・硬岩を対象とした山岳トンネル工法とNMTの比較

項目	わが国の山岳トンネル工法	NMT
覆工	覆工コンクリートを必要とする	支保工を永久支保工とし、覆工コンクリートを必要としない
吹付けコンクリート	金網、鋼製支保工を設置し吹付けコンクリートを施工	鋼繊維補強吹付けコンクリートを施工
ロックボルト	全面定着式鋼製ボルト	全面定着型高張力耐腐食ロックボルト（腐食防止被覆ボルト、ファイバーボルト）

激しい地山でのトンネル施工において、ADECORS(Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils)なる山岳トンネル工法が発展してきた。ADECORSは、トンネル横断面での支保工やグラウンドアーチの形成のみならずトンネル縦断方向の安定を重視している。すなわち、鏡面およびその前方地山の変位抑制が重要と考えており、横断面を支保していても切羽が不安定なトンネルは崩落するというのである。この考え方は切羽の安定が重要となる土砂地山におけるわが国のトンネル施工の考え方と軌を一にしている。トンネル縦断面内での安定を確保するためにイタリアにおいては、掘削前に単管パイプなどを切羽天端前方に向けて挿入し地山を拘束する先受け工や、鏡面の前方に向けてロックボルトを打設する鏡ボルトが積極的に適用されており、これら補助工法のシフト長は15～20m程度とわが国のそれより若干長めとなっている。

(3)トンネル掘削機械

山岳トンネル工法の掘削方式には、爆破掘削と機械掘削とがあり、機械掘削に用いる機械はトンネル断面を部分的に切削していく自由断面掘削機械と全断面を一度に切削する全断面掘削機械（トンネルボーリングマシン（TBM））に大別できるが、わが国においては自由断面掘削機械が多く用いられ、欧州においてはわが国と比較してTBMが比較的多く用いられている。これは、TBMが欧州の比較的均一な地質には適合したものの日本の複雑な地質に適合しなかったため欧州ほど普及するには至らず、かわって地質の変化にフレキシブルに対応できるという特徴を持った自由断面掘削機械が広く使われるようになったことによるも



写真-1 飛驒トンネルTBM全景

のと推察される⁷⁾。TBMは1990年代に欧州などで高出力化・堅牢化等の技術開発が進んだことにより、近年わが国においても再度脚光を浴びるようになり、第2東名神高速道路のトンネルの先進導坑として広く使われ、飛驒トンネルでは全断面TBMが本線道路トンネル断面の掘削に使われている（写真-1参照）。

(4)補助工法関連施工技術

不良地山対策として、欧州、特にイタリアにおいてはトンネル周辺の地山を積極的に改良・補強してトンネルを大きな断面のまま掘削することが合理的であるとして長尺先受け工が開発され、普及している。欧州では長尺先受け工は専用機により施工されている例が多いが、最近ではわが国で適用されている長尺鋼管先受け工の施工と同様に装薬孔等を穿孔するために削岩機を装備した移動台車（ドリルジャンボ）による実施が増加している。また、上下線2本のトンネルが近接している場合には、2本のトンネルを同時に施工することにより、トンネルの掘削効率の向上を図るなどの対応が行われている。つまり、1本のトンネルでは長尺鋼管先受け工の施工、別のトンネルでは掘削という工程を2本のトンネルで相互に繰り返しながら掘進することにより、補助工法専用機械の稼働率を向上させるとともに、トンネル施工効率の改善を図っている。

(5)総括

一般的に見るとわが国は複雑な地質条件に適合できるように山岳トンネルの施工技術を改良・発展させてきたため、近接施工の技術、めがねトンネルの技術、補助工法（パイプルーフ、ジェットグラウト、長尺鋼管先受け工等）などについては、多くの独自技術を保有しており、施工技術のポテンシャルは高いが、実績重視の風潮が根強く、削岩・注入等の個別施工技術・施工機械の高度化や新材料等の開発より、設計・施工の標準化等を押し進め、施工技術の体系化やマニュアル化を優先させる傾向にある。一方、欧州は、鉱山開発・軍需産業等を背景として、削岩、発破、油圧機器等の基本技術が優れており、積極的な新技術・新材料の導入や汎用機械の省力化・大型化と相まって長大トンネルの急速施工を可能としており、また、掘削機械や長尺先受け工の施工機械等の高機能

化・高出力化に積極的である。

3.2 シールドトンネル工法

都市部等におけるトンネルの建設工法は、周辺環境に与える影響が比較的少ないことなどからシールド工法が従来から一般に用いられてきている。シールドトンネル工事におけるシールド型式としては、わが国、欧州とも密閉型シールド工法を用いる場合がほとんどであるが、欧州ではシールド工法を用いる地山においても切羽が自立することがあることから開放型シールドも用いられている。密閉型シールド工法のうち、泥水式か土圧式（泥土圧式を含む）を用いるかについては、正確な統計がないのでわからないが、どちらも同程度使用されているようである。

(1)シールド外径と掘進速度

シールドトンネルの外径は、シールドトンネル工法がわが国において本格的に用いられた当初は下水道工事が主体であったことから欧州に比して小口径のものが多かったが、近年においては道路トンネル等に用途が拡大するところとなり大断面化が著しい。また、同じ用途で比較するとわが国のトンネル外径の方が欧州のそれよりやや大きく、例えば、2車線の道路トンネル断面については欧州では外径12m前後であるが、わが国では13m前後である。これは道路の構造規格、換気方式、非常用施設等の違いによるものと考えられる。シールドの掘進速度について比較すれば、一般に欧州の方が掘進速度は高い。これは地質条件等の違いが大きいと推察されるが、わが国の外径13mの道路トンネルにおいては平均月進120m、最大月進200mであるのに対し、欧州では外径15mの道路トンネルにおいて平均月進500m、最大月進では800mを超えるような記録を持っている⁸⁾。

(2)セグメント寸法

シールドトンネル工事で用いられるセグメントについて比較すれば、図-5に示すとおり、大断面トンネル（約10m以上）のセグメント幅は、欧州では2mが常用されているが、わが国では従来は1.5m程度であった（今後建設予定の道路トンネルにおいては2mを使用することとなっている）。

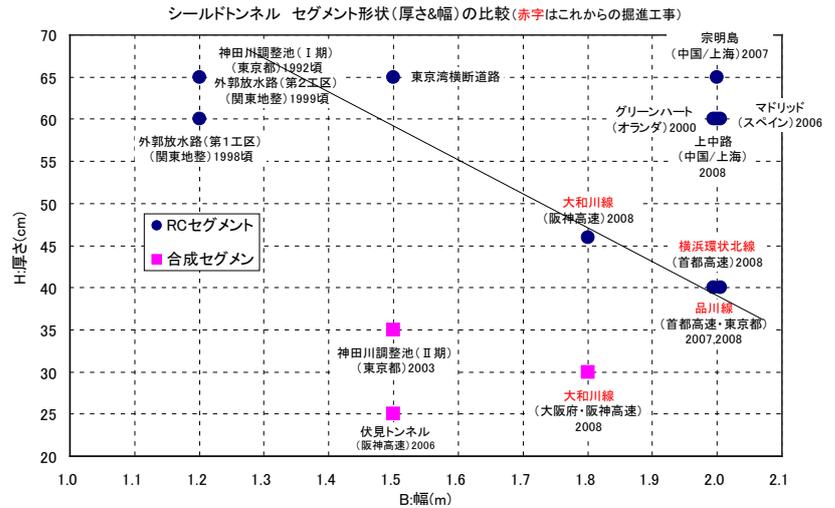


図-5 大断面シールドトンネルに使用されたセグメントの幅と厚さ⁹⁾

セグメントの厚さについては、わが国、欧州とも60cm程度であるが、わが国では今後建設予定の道路トンネルにおいては更なる薄肉化を図り、40cm程度を使用することとなっている。また、わが国においてはコスト縮減の観点から、最近では2次覆工を省略することが多くなってきており、道路トンネルで必要とされるセグメントの火災対策としては、海外で用いられている方法を参考とし、セグメント内面に耐火材を取り付ける方法が取られている。

(3)総括

こうして見ると、わが国と欧州のシールドトンネル技術は同等の水準にあると考えられ、欧州、わが国ともシールド外径の大型化と掘進速度の向上、セグメントの大型化についての取り組みが進められてきたと言えよう。今後も、わが国と欧州でシールドトンネル工法について激しい技術開発が進められ、アジア等において激しい受注競争が繰り広げられることが予想される。

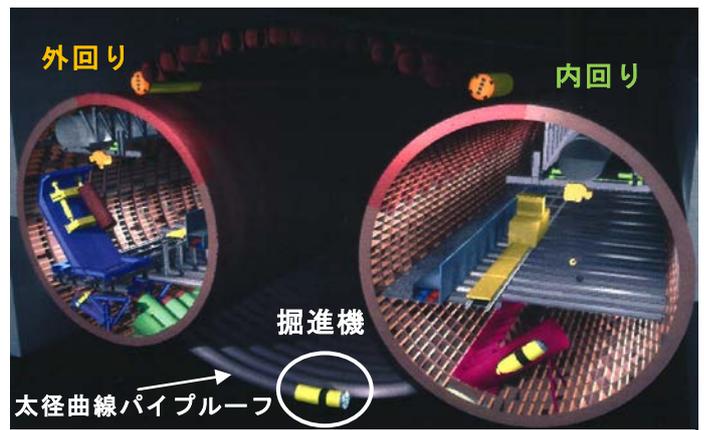


図-6 太径パイプルーフの施工イメージ

一方、都市内道路を地下に構築するにあたってはランプやインター部において分合流部を有すること等から、わが国においてはこれまで開削工法が主に用いられてきた。近年これらの工法にかわって、分合流部を非開削工法により建設する事例が見られるようになってきている。一例として、首都高中央環状新宿線においては、非開削工法のうち、シールドトンネルの下方を太径パイプルーフに支保し、分岐合流部を構築している（図-6参照）。当該分野についてはわが国のトンネル技術が欧州より先んじていると考えられ、今後アジア等国外における道路トンネルの受注競争における大きなアドバンテージとなる可能性を秘めている。

4. まとめ

4.1 舗装技術について

舗装分野においては、大まかには、構造設計などの基礎的な分野では欧米が、排水性舗装や温度低減舗装などの応用的な技術開発の分野では日本が比較的進んでいると言える。これまで舗装技術は日本国内で独自に発展してきた感があるが、今後は舗装事業の海外への展開も見据え、より国際的な視点で研究・技術開発を進めていく必要がある。

4.2 トンネル技術について

トンネル分野においては、山岳トンネル工法についてはわが国、欧州とも同じ技術レベルであるが、近接施工の技術、めがねトンネルの技術、補助工法（パイプルーフ、ジェットグラウト、長尺鋼管先受け工等）などについては、わが国が多く独自の技術を保有しており、施工技術のポテンシャルは高いと考えられる。シールドトンネル工法については、わが国と欧州のシールドトンネル技術は同等の水準にあると考えられ、欧州、わが国ともシールド外径の大型化と掘進速度の向上、セグメントの大型化についての取り組みが進められてきたと言える。今後、山岳トンネル工法、シールドトンネル工法ともに、如何に高速かつ安全に施工するかということが課題になると考えられる。また特に、都市内道路の地下構築においては地上部の道路交通に極力影響を与えずに如何に分岐合流部を構築するかというのが課題になるもの

と考えられ、これらの領域において技術開発を推し進め、わが国の先端技術が今後世界で適用されることを大いに期待するものである。また、トンネル分野においても海外への事業展開を見据え、国際的な視点で研究・技術開発を進めていくことは言うに及ばず、わが国の優れた技術を官民一体となって如何にマーケティングしていくかが重要な課題となるものと考えられる。

参考文献

- 1) 「舗装設計便覧」、(社)日本道路協会、2006
- 2) Design Manual for Roads and Bridges、イギリス連邦道路庁
- 3) Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen、ドイツ連邦交通省
- 4) 例えば、「情報化施工推進戦略」、国土交通省ホームページ
http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000009.html
- 5) 南ほか：機械施工における情報交換基盤構築に向けたデータ定着手法に関する研究、土木情報利用技術論文集Vol.16、pp.289-296、(社)土木学会、2007
- 6) 「トンネル技術白書」、(社)日本トンネル技術協会、2006
- 7) 今田徹：「何がトンネル技術を発展させたか」、(財)先端建設技術センター、2004
- 8) 今田徹：「都市道路トンネルの技術」、(財)先端建設技術センター、2007
- 9) 新日本製鐵株式会社社内資料より

久保和幸*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術
研究グループ舗装チーム
上席研究員、工修
Kazuyuki KUBO

角湯克典**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム 上席研究員、工修
Katsunori KADOYU