

# トンネルの補修・補強に関する技術開発動向

## — LCC に基づく補修・補強技術の分類と未来型補修機械の方向性

(社)日本建設機械化協会 機械部会 トンネル機械技術委員会

社会資本である土木構造物は、今日に至るまで数多く建設されてきた。とくに、第二次世界大戦後の経済復興期から高度経済成長期にかけて、その種類、建設数ともに急速に増加した。一方で、土木構造物が建設されてから長期間が経過し、劣化によって使用性、安全性が確保できず補修・補強を必要とするものや社会情勢の変化から要求性能が変更となり改築が必要となる事例も多くなってきている。そこで、現在、土木構造物に対しても LCC (Life Cycle Cost) の概念を適用した構造物の管理を行う動きが高まり、計画・設計、施工、維持管理、改築・廃棄までの各段階における費用を把握する検討が行われている。また、公共事業費が削減される等、財政的・人的資源の制約を受ける中で、既設構造物の長寿命化も重要な課題となっている。

こうした中で、(社)日本建設機械化協会・機械部会・トンネル機械技術委員会・未来型機械分科会では、トンネルの補修・補強技術を構造物の長寿命化の観点から、LCC の概念を導入した分類を試みた。さらに会員各社に対しアンケート調査を実施して現状の補修・補強関連技術の収集と分類を行った。

キーワード：LCC、維持管理、トンネル、補修、補強、供用性

### 1. LCC に基づく補修・補強技術の分類

構造物の維持管理を実施する場合、図-1 に示すような時間を考慮した性能照査が必要不可欠である。このためには、まず「構造物の寿命」または「構造物の長寿命化」の定義を明確にしておくことが重要である。

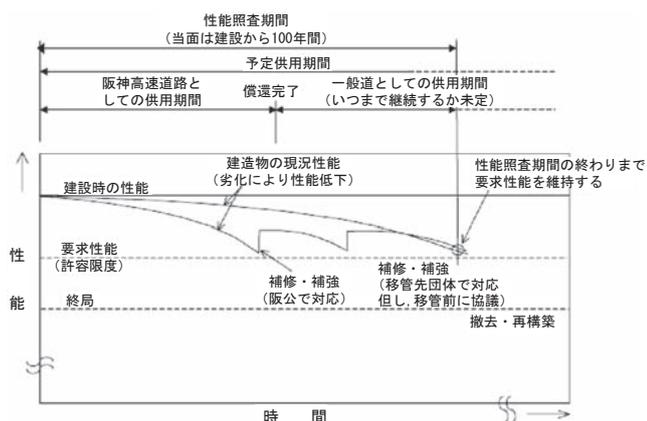


図-1 性能照査期間の概念<sup>1)</sup>

「構造物の寿命」を既設構造物に対して改築や新設が必要となる時と定義すると、次のように機能が喪失した状態が「寿命がきた」状態であると定められる。

#### ① 構造安全性の喪失 (使用性、安全性の喪失)

地圧や地震、岩盤崩壊などの外的要因または材質劣

化、構造的欠陥等の内的要因 (時代ごとの技術レベルに起因するもの、あるいは施工上の不具合) によって構造が破壊され、使用性や安全性が喪失する状況

#### ② 経済合理性の喪失

材料の劣化等によって維持管理費が増大し、ライフサイクルコストが改築や新設を上回る状況

#### ③ 機能の陳腐化

建築限界が旧基準で設計されているために交通容量が不足しているなど、構造物の社会的ニーズに対してその機能が要求性能に合致していない状況

「構造物の長寿命化」とはこれらのトンネル構造安全性の喪失・経済合理性の喪失・機能の陳腐化のいずれかによって、早期に「寿命がこない」ように予防することと定義できる。また、それらは性能照査手法に基づく、「調査・診断技術」を含めて、「分類Ⅰ健全度維持型補修・補強技術」、「分類Ⅱ健全度低下速度抑制型補修・補強技術」、「分類Ⅲ健全度増加型補修・補強技術」、「分類Ⅳ要求性能対応型改築技術」および「分類Ⅴ高性能・高機能型建設技術」の6つに分類することができる。

#### (1) 調査・診断技術

トンネルの補強・補修の必要性を検討するためには、まず既設トンネルの耐久性や機能等について現状を調

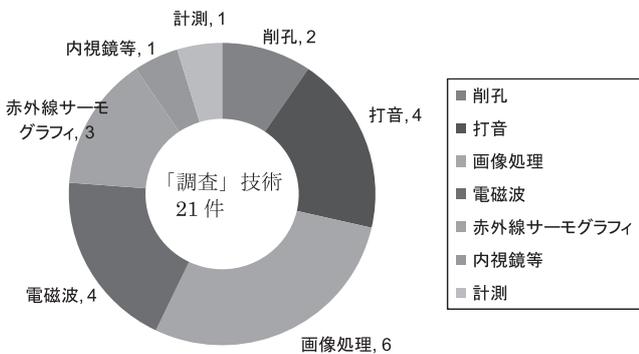
査・判定する必要がある。調査結果に基づいてトンネルの機能と健全性を正しく把握し、補修・補強の必要性の判断など、対策工の計画・設計を行う。

調査・診断技術は、表一に示すように、清掃、調査およびデータ処理技術の3つに大別できる。

表一 調査・診断技術の分類

分類	
① 清掃	削孔 打音 画像処理
② 調査	電磁波 赤外線サーモグラフィ 内視鏡, CCD, コアリング 計測
③ データ処理	データベース

「清掃」技術ではトンネル水噴射設備点検車と重曹を用いたブラスト洗浄等の2件、「データ処理」技術ではデータベース化による診断・評価ツールとモニタリングシステム開発等の2件の合計4件の技術開発が確認されたが、「調査」技術に関するものは21件と多く、打音調査、画像処理、電磁波探査および赤外線サーモグラフィを用いた調査技術の開発が進められている(図一2)。



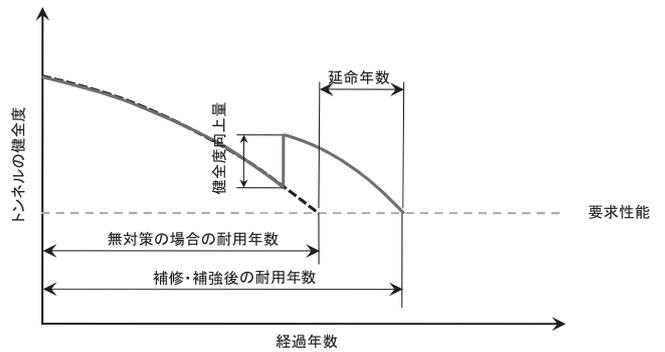
図一 2 診断・調査技術の開発動向

(2) 分類Ⅰ 健全度維持型補修・補強技術

図一3に示すように、健全度維持型補修・補強技術は、覆工の小規模の不具合やひび割れ等に対して、従来から一般に行われてきた小規模の対症的な補修・補強技術であり、大幅な健全度の回復を期待しない比較的簡易な補修技術である、

現在、研究・開発されている健全度維持型補修・補強技術は、表一2のように分類できる。

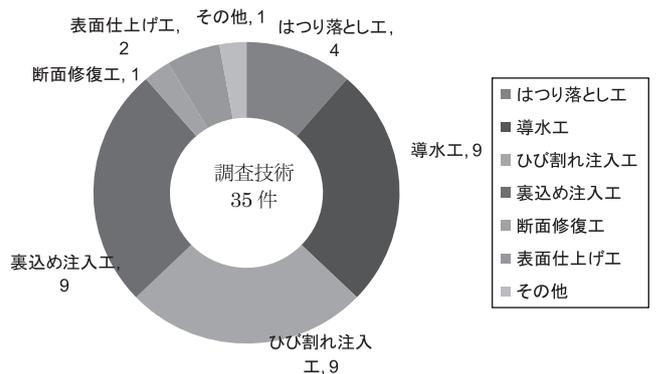
健全度維持型補修・補強技術について調査した結果、「導水工」「ひび割れ注入工」および「裏込め注入工」



図一 3 健全度維持型補修・補強技術のLCC概念図<sup>2)</sup>

表一 2 健全度維持型補修・補強技術の分類

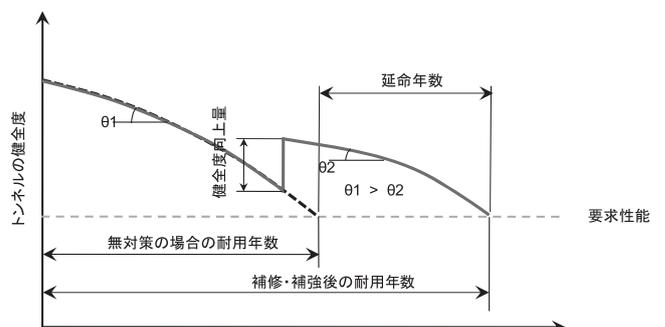
分類	
① はつり落とし工	
② 湧水処理工	導水工 ひび割れ注入工
③ 裏込め注入工	
④ 断面修復工	
⑤ 表面仕上げ工	
⑥ その他	



図一 4 健全度維持型補修・補強技術の開発動向

に関して新しい補修・補強技術の開発が進められていることがわかった(図一4)。

(3) 分類Ⅱ 健全度低下速度抑制型補修・補強技術  
健全度低下速度抑制型補修・補強技術は、図一5に



図一 5 健全度低下速度抑制型補修・補強技術LCC概念図<sup>2)</sup>

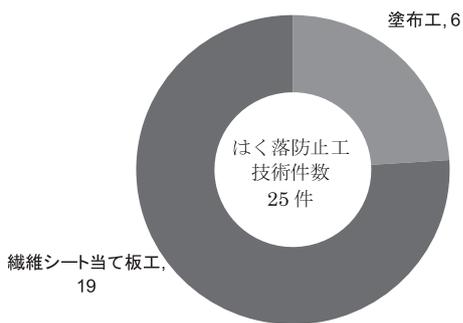
示すように外的要因に起因する部材の劣化を遅らせることで、トンネルの長寿命化を図る補修・補強技術である。

現在、開発されている健全度低下速度抑制型補修・補強技術は、表一3のように分類される。

表一3 健全度低下速度抑制型補修・補強技術の分類

分類	
① 防食工	
② はく落防止工	塗布工
	繊維シート当て板工

健全度低下速度抑制型補修・補強技術について調査した結果、「防食工」に比べて「はく落防止工」に関する技術開発が進められていることがわかった。さらに、開発されているはく落防止工の種別を見ると図一6に示すように「繊維シート当て板工」に関する新しい補修・補強材料が研究・開発されている。

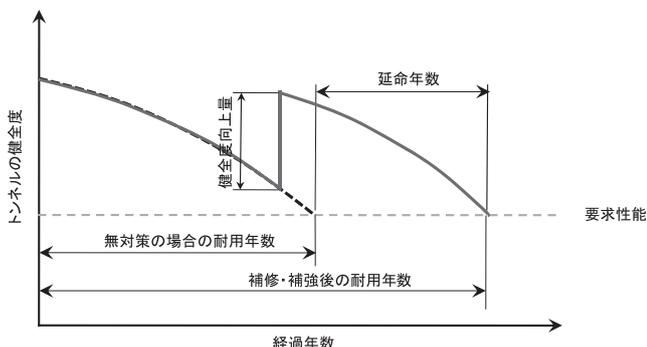


図一6 健全度低下速度抑制型補修・補強技術の開発動向

(4) 分類Ⅲ 健全度増加型補修・補強技術

健全度増加型補修・補強技術は、図一7に示すようにトンネルの健全度を補修・補強によって高度に回復・補強することで、長寿命化を期待するものである。

健全度増加型の補修・補強技術について調査した結果、図一8に示すように「内巻き工」が多数を占め、

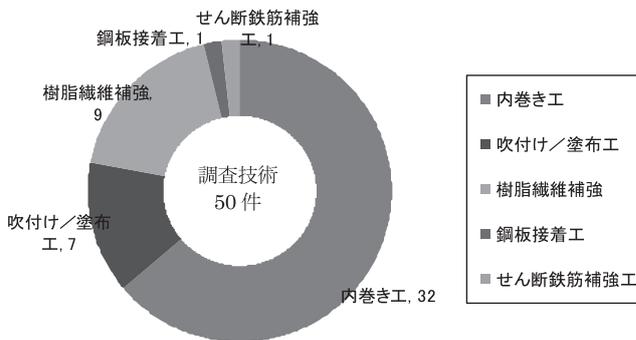


図一7 健全度増加型補修・補強技術のLCC概念図<sup>2)</sup>

次いで「樹脂繊維補強工」, 「吹付け／塗布工法」に関する新しい補修・補強技術が開発されていることがわかった。

「内巻き工」はトンネル内部で補強材を組立てる「組立工法」, 管渠内で管を製造する「製管工法」および管渠内に管を挿入する「管挿入工法」に分類される。

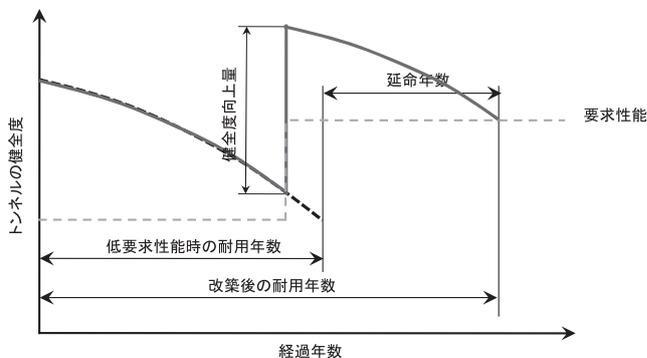
それらのうち、「組立工法」に関する技術開発が最も研究されている。



図一8 健全度増加型補修・補強技術の開発動向

(5) 分類Ⅳ 要求性能対応型改築技術

要求性能対応型改築技術は、社会的ニーズの変化から、建築限界を大きくする、あるいは地震に対する耐力を大きくするなど、図一9に示すように補修・補強によって要求性能の変化に対応させる改築技術である。



図一9 要求性能対応型改築技術のLCC概念図<sup>2)</sup>

要求性能対応型改築技術は、表一4のように分類することができる。

調査の結果、トンネル改築に関する技術開発件数は19件で道路および導洞・管渠に関するものが多く、それぞれ40%ずつを占め、鉄道が約20%となっている。

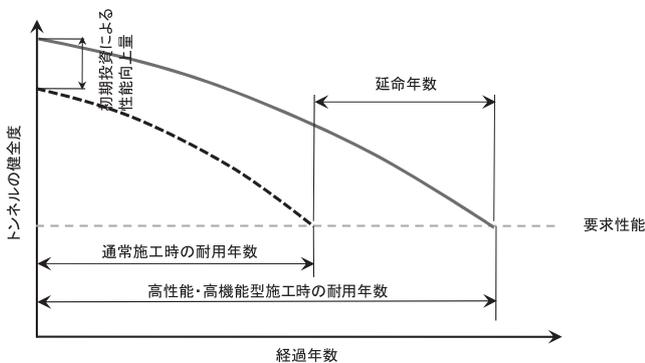
表一4 要求性能対応型改築技術の分類

分類
① 道路トンネル改築技術
③ 鉄道トンネル改築技術
③ 導洞・管渠改築技術

トンネル改築時に最も問題となる既設トンネルの供用性について、道路トンネルの場合では開発技術の約90%が供用可能な改築技術であるが、導洞・管渠および鉄道の改築技術に関しては現状では30%程度しか供用しながらの改築ができない現状となっている。

(6) 分類Ⅴ 高性能・高機能型建設技術

高性能・高機能型建設技術は、劣化に対する将来的な補修を不要とするために、トンネル建設時からトンネルの性能を高めておくことで長寿命化を期待する建設技術である(図—10)。開発技術として、高防水工技術、部材の高性能化(高耐久性, 高強度, 高耐火性)および高耐震化技術が挙げられる。



図—10 高性能・高機能型建設技術のLCC概念図<sup>2)</sup>

高性能・高機能型建設技術は、表—5のように分類される。

表—5 高性能・高機能型建設技術の分類

分類	
①	高防水性技術
②	高性能化技術
	高耐久性
	高強度 高耐火性
③	高耐震化技術

高性能・高機能型建設技術について今回の調査で得られた18件の技術を整理すると、「部材の高性能化」に関する「高耐久性・高強度・高耐火性」に関する項目が全体の83%(15件)を占める。次いで「高耐震化」についての技術開発が多い結果となっている。

高性能化技術として、シールドトンネルのセグメントに耐久性等を有する原材料を使用する、内周面を特殊樹脂等で覆う、あるいは外周面に防水シートを布設するなどの工法がある。また、トンネル覆工コンクリート中に各種繊維材を混入する、短時間に初期強度を発生させる吹付けコンクリート材を使用する、あるいは、

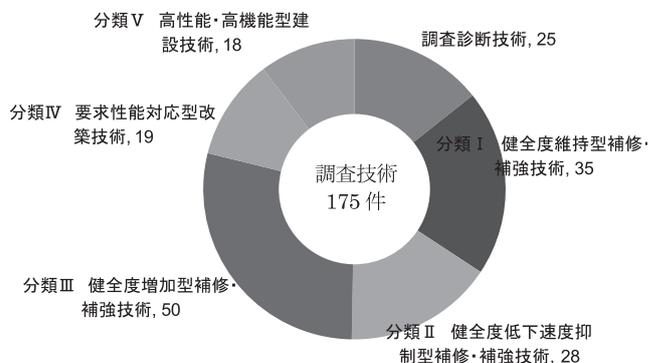
覆工コンクリートの乾燥やひび割れを防ぐために特殊養生装置を使用する等の方法によって耐久性や強度および耐火性の向上を図っている。

2. 補修・補強技術の調査結果のまとめ

(1) 補修・補強技術の全体的傾向

補修・補強技術別の開発状況の内訳を図—11に示す。調査技術175件の全体的な傾向を数的比率で比較すると、調査診断技術、分類Ⅰ健全度維持型補修・補強技術、分類Ⅱ健全度低下速度抑制型補修・補強技術および分類Ⅲ健全度増加型補修・補強技術の割合が大きく、分類Ⅳ要求性能対応型改築技術および分類Ⅴ高性能・高機能型建設技術が比較的少ない傾向にある。

これは、補修・補強技術開発の当初の目的が、まず現況の劣化した部分の補修をどのように行うかという問題に直面していたことによるものと考えられる。とくに、これまで土木構造物建設時に社会構造の変化に伴って要求性能が変化することへの配慮やライフサイクルを考えた社会資本投資を効率的に行うための具体的方策についての研究がなされてこなかったために、要求性能対応型や初期投資型の建設技術の開発が遅れているものと考えられる。ただし、分類Ⅳおよび分類Ⅴに関する技術開発は、現在、増加傾向にある。



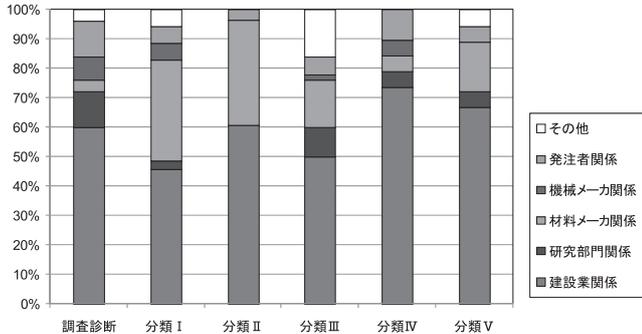
図—11 トンネルの補修・補強技術の内訳

(2) 補修・補強技術の研究開発者

補修・補強技術別の開発業種比率を図—12に示す。いずれの技術分類においても建設業関係の関与が高いことがわかるが、とくに分類Ⅰおよび分類Ⅱでは材料メーカーの比率が高くなっていること、分類Ⅳおよび分類Ⅴで建設業関係の比率が際立って高いことがわかる。分類Ⅰおよび分類Ⅱは構造物の表面補修などの簡易な箇所への対症療法的な技術であり、その技術開発費用も比較的安価で、かつ、材料の販売で開発費を回収することができることに対して、分類Ⅳおよび分類

V技術は、構造物の抜本的な補修・補強であるため膨大な研究開発費が必要となる上に、開発費も非常に高価であることが、こうした理由の1つとして考えられる。

一方、機械メーカーやコンサルタントあるいは発注者独自の技術開発は比較的少ない傾向にあるので、今後の構造物維持管理分野への積極的な対応が望まれる。



図一 12 トンネルの補修・補強技術に関する開発者の内訳

### 3. 補修・補強用未来型建設機械のあるべき姿

#### (1) 未来型建設機械のあるべき姿

補修・補強に関する未来型建設機械のあるべき姿として、現在の少子高齢化社会、国際化社会でも既存インフラの延命・再利用を効率的に行うことができる使いやすい機械（道具）で環境と安全面が十分に配慮されていることが必須であり、下記の条件を満足することが求められる。

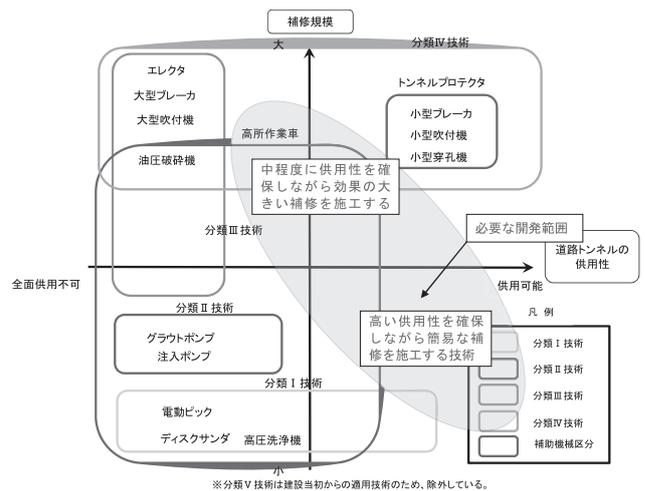
- ① 施工環境を考慮してトンネルを供用しながら利用者に被害を与えることなく、高所でも安全に施工できる機械、または、作業の占有面積が小さい機械
- ② コンパクトで多機能性を持たせた機械
- ③ 工期をできる限り短縮することで利用者への影響を最小限に抑えることができる高速施工対応型の機械
- ④ 特殊作業員を必要とせず、使い勝手のよい機械で、とくに作業員の年齢、性別、国籍、技能等にかかわらず確実な操作（施工）を行うことができる機械
- ⑤ 熟練度に左右されない高精度の施工を実現できるICTを活用した情報化施工が適用できる機械および補修・補強システム
- ⑥ 地球環境にやさしい材料を原料とする補修・補強材料、または、CO<sub>2</sub>の排出量が少ない機械

#### (2) 補修時のトンネルの供用性に着目した建設機械

調査・診断技術から分類IVまでの補修・補強施工機械を、横軸にトンネルの供用性、縦軸に補修規模をとって分類すると、図一 13 のように整理できる。

分類Iは場合によって高所作業車を用いて施工する技術である。比較的小規模な補修・補強工事であるので、トンネルの供用性は確保しやすい場合が多い。分類IIも分類Iと同様に高所作業車を用いて施工するが、規模および補修規模ともに分類Iよりは大きい。したがって、トンネルの供用性は分類Iに比べて劣る。分類IIIは作業床として高所作業車を用いる場合と用いない場合の両方があるが、いずれも補修規模が大きいので、トンネルを供用しながらの施工は難しく、ほとんどが全面通行止め等の措置が必要となる。分類IVは全面通行止めにして施工を行うことを基本としているが、トンネルプロテクタを用いる、あるいは専用の補修機械を適用して供用性を確保する場合がある。

供用性に着目すると、今後、中程度の供用性を確保しながら効果の大きい補修を行うことができる、あるいは、高い供用性を確保しながら簡易な補修ができる機械（作業床）の開発が必要になると考えられる。



図一 13 必要な補修・補強技術および機械の開発分野

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 阪神高速道路公団：性能照査型維持管理要領（案）、2002年6月
- 2) (財)道路保全センター：道路保全研究会、平成18年度報告書（一部加筆・修正）、2007年
- 3) (社)日本建設機械化協会：トンネルの補修・補強技術に関する調査研究報告書、2007年

#### 【筆者紹介】

河上 清和（かわかみ きよかず）  
 五洋建設株式会社  
 本社 土木本部土木設計部  
 部長

