

ライフサイクルを考慮したトンネルの設計 The tunnel design for efficient of life cycle cost

水野敏実*・石村利明**・加茂富士男***・廣瀬末雄****
Toshimi MIZUNO, Toshiaki ISHIMURA, Fujio KAMO, Suelo HIROSE

ABSTRACT: In this paper, the authors have classified problems in maintenance of tunnel, that should be reflected to design after reviewing existing papers. The authors have extracted problems about groundwater, deterioration, evaluation of ground condition, inspection and cleaning that are important in maintenance stage. And, the authors have introduced basic ideas about appropriate judgement and countermeasure about deterioration, cut-off of water condition, rethinking of ground condition, labour-saving process of inspection and cleaning, that should be reflected to design stage in order to prove the problems mentioned above.
KEY WORD: road tunnel, life cycle cost, groundwater, deterioration, evaluation of ground condition

1 はじめに

近年、ストックの増大とその管理費の膨張は、投資額に大きなウェイトを占め、新規投資を圧迫するに至っている。図-1.1¹⁾には、1,200m のトンネルを建設した場合の建設費と維持管理費の経年の累計を示した。建設後 40 年程度で維持管理費は建設費と同程度の金額に達するとの試算であり、社会資本整備における維持管理費の増大は顕著である。また、今日の社会・経済情勢を考慮すると建設コストの縮減や環境・安全に配慮した施設整備のあり方が問われており、合理的で効果的な公共投資や将来の維持管理をも視野に入れた施設整備が要求されている。

地下構造物、中でも道路や鉄道の重要な施設であるトンネルは、その立地条件の特殊性や維持管理の困難さ、あるいは施設の更新に膨大な費用が必要であることから、ライフサイクルコストを考慮した施設整備が必要である。特に、施設の重要性や長期に使用される構造物の性格に配慮すると、メンテナンスフリーの考え方をどこまで導入するかが重要である。これらを考慮したトンネルに関する項目としては、防水、劣化、立地条件あるいは地山条件に対する評価、付帯設備の耐久性等があり、これらを分析し、メンテナンスと設計の連携を図り、維持管理の現状を設計にフィードバックさせることが重要である。

ここでは、地下構造物（主にトンネル）のライフサイクルコストをいかに考えるか、即ち防水、劣化、地

キーワード：道路トンネル、ライフサイクルコスト、地下水、劣化、地山評価

* 正会員 応用地質株式会社技術本部道路部

** 正会員 建設省土木研究所道路部トンネル研究室

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社CM部

****正会員 株式会社建設企画コンサルタント設計本部トンネル室

山評価等の維持管理上の問題をどの程度まで設計に反映させるかについて既往資料の基礎的な調査を行い、維持管理の現状を的確に反映した設計について提案し、今後、ライフサイクルコストを考慮した設計を行うことにより、合理的なトンネルの施設整備が行われることを目指すものである。

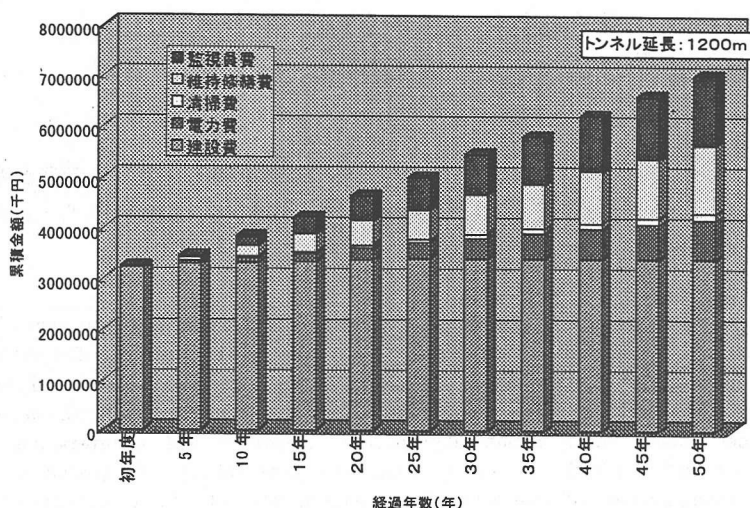


図-1.1 道路トンネルの建設費および維持管理費の累計

2 トンネルの設計の現状

山岳トンネルの設計手順は、図-2.1に示すように地山条件及び立地条件に応じて構造を決定する手順がとられている。これらには、これまでの施工経験や工法の特徴を反映して、地山分類による標準支保パターンの適用や理論解あるいは数値解析により支保やトンネルの構造を決定する方法としている一方で、既に設計段階で管理段階における維持管理の経験を反映させる項目が含まれている。具体的には、舗装の維持保守を容易にするためのオーバレイ、管理用通路、あるいは断熱材や照明の反射率を低下させないための内装のスペース等である。

こうした現状の設計手法によっても、後述するように維持管理段階において、大規模な補修改築を余儀なくされる場合やランニングコストが増大する事例など、今後、維持管理における問題点を適切に設計・施工に反映させ、合理的な構造物設計の実現を図る必要のある項目がいくつか挙げられる。ここでは、地下水、構造物の劣化、地山条件の判断に関する問題点について整理し、今後の設計に配慮すべき点について提案する。

3 維持管理からの設計への提案

3.1 地下構造物の維持管理上の問題点

トンネルの構造は、その時々々の社会・経済情勢や工法の発展状況によって影響されるものであり、加えて当時の調査精度あるいは調査技術、設計思想を反映して構造物設計が行われているのが実態であり、現時点での最新の見解により問題点が見出される場合にも、単純に誤りを指摘できるものではない。しかし、現実問題として維持管理段階で、立地条件の変化や過酷な地山条件による維持管理費の増大等が生じている。

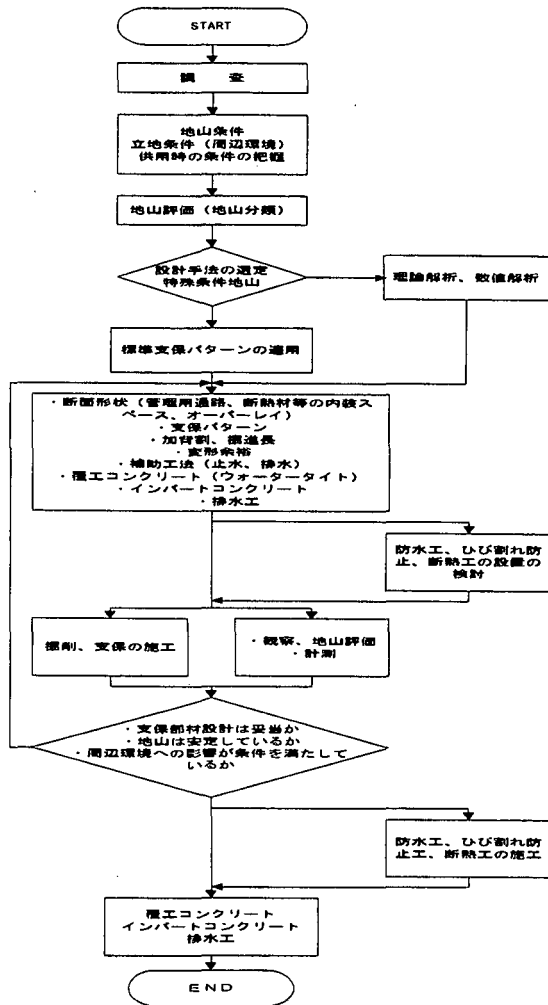


図-2.1 山岳トンネルの設計手順²⁾ (一部修正・加筆)

維持管理上の問題点は、地下水、構造物の劣化、正確な地山条件の把握の困難さによるものが多く、構造物の変状等の機能上の問題により、交通等の安全確保に支障が生じ、機能確保のための維持修繕は厳しい条件下で難工事を強いられることが多く、迅速かつ適切な対応が迫られている。

近年、地下構造物のストックの充実とともに、維持管理段階における問題が発生し、こうした点を今後の構造物設計に反映させる必要がある事項が顕在化しつつある。ここでは、文献の引用により、典型的な維持管理段階におけるトンネルの問題点を整理する。

(a) 地下水に関する問題 (地山条件、立地条件の変化)

首都圏では、地下水低下による広域的な地盤沈下を抑制するため、昭和46年の地下水汲み上げ規制が施行され、その後、首都圏の地下水は回復傾向にある。図-3.1に上野駅周辺の地下水回復状況³⁾を示す。このことにより、予想外に回復した地下水が、当初の構造物設計時に想定した地下水位を超え、トンネル内への漏水とそれに伴う構造物の劣化はもとより、地下水圧により構造物の安全率の低下を引き起こすといった事例が増えている。

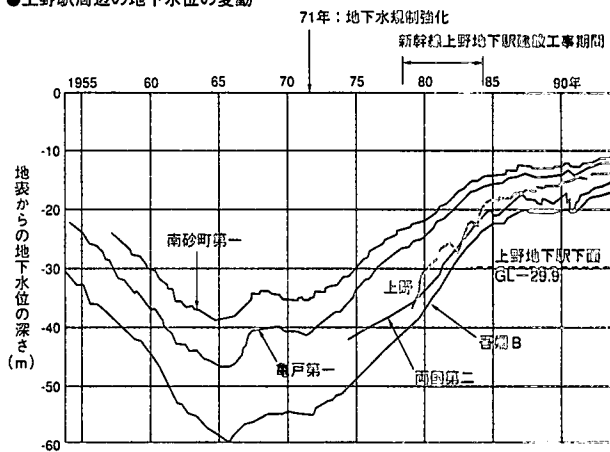
J R総武線トンネル⁴⁾では、地下水位の上昇により構造物の変状をきたし、二次覆工の増設を実施している。また、帝都高速度交通営団では地下水位の上昇によりトンネル内への漏水が増大し、下水道使用料が年間10億円に達するほか、レールの電食、道床破壊、電気設備の腐蝕劣化により保守費が増大しているとの報告⁵⁾がある。

●地下水位観測位置



○地下水位観測井戸

●上野駅周辺の地下水位の変動



上のグラフは東京都土木技術研究所が作成した「平成5年度地盤沈下調査報告書」のデータに上野地下駅の観測結果を加えたもの。70年代から地下水位が急上昇している様子がはっきりとわかる。

図-3.1 上野駅周辺の地下変動状況³⁾

(b) 構造物の劣化

構造物の劣化により維持管理のコストが増大する、あるいは歴史のある構造物の周辺環境が変化して、近接施工によるトンネルの変状が発生する等の問題が生じている。帝都高速度交通営団銀座線は、建設後70年を経過し、老朽化が著しいことに加え、地下水の変動、河川の埋め立てや路面荷重増加によるトンネル変状が生じ、更に構造物に近接したビルの新築や立体交差などの近接施工による変状が増加している⁵⁾。

また、道路トンネルにおいてトンネルの変状や落盤事故といった事例^{6), 7)}があり、トンネル構造物の変状及び劣化に対する的確な施設の管理が重要な課題となっている。

(c) 地山条件等の評価

山岳トンネルにおいて、いわゆるNATMで施工された比較的新しいトンネルに変状が生じ、インバート設置等の抜本的改築を余儀なくされる事例がある。一般にインバートの活線改築は、初期投資と比べて費用が高く、維持管理費の増大とともに、構造物のライフサイクルコストを引き上げる原因となるため、設計・施工時のインバートの設置の判断が重要である。

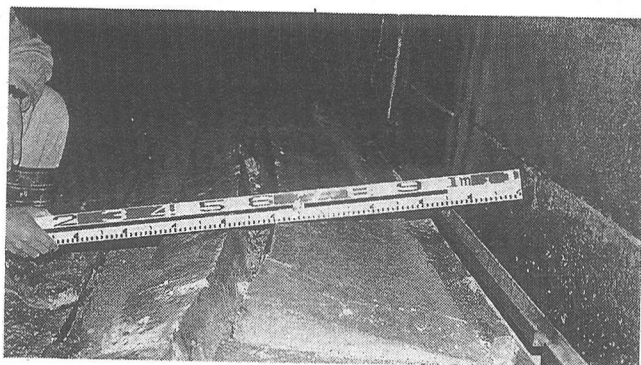
長崎自動車道俵坂トンネル⁸⁾は、複雑な地質構造や地山強度の定量的な評価等地山条件の把握の困難さから、設計・施工時にインバートの設置を見合わせた区間において、供用後に路面が150mm以上隆起し、交通に支障をきたすほか、トンネル構造の安定化を目的としてインバートの再設置を行った。こうした事例は塚山トンネル⁹⁾等、近年多くのトンネルで見受けられ、トンネルの変状事例が増加する中で、トンネル変状対策にインバートの設置を採用し、通行規制を伴う制約条件の厳しい中での難工事が行われている。

(d) 点検・清掃作業の問題点

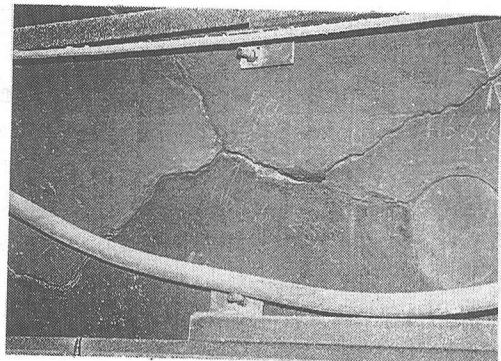
道路トンネルの維持管理の重要な項目として点検・保守・清掃がある。点検・保守の対象は、土木構造物よりもライフサイクルが短いトンネル付帯設備が中心となる。清掃は、路面の汚損防止、壁面内装の視線誘導効果の維持、照明灯具の照度などの確保のために実施する。

これらの点検・保守・清掃作業は、作業環境の悪く、長時間に及ぶ高所作業を強いられることが多い。

また、作業量の多い壁面内装の清掃や照明器具の清掃あるいは灯具の交換は、道路の通行規制を伴う。このような点検・清掃などマンパワーを必要とする作業費用は、維持管理費の20%を占め¹⁾、省力化が望まれる。



a) 路側帯（路面隆起状況）



b) トンネル側壁の亀裂

写真-3.1 俵坂トンネル変状状況⁸⁾

3.2 設計に考慮すべき事項の提案

(a) 地下水位等地山条件、立地条件の変化への対応

設計当初の地山条件や立地条件の変化により、構造物に変状を来す事例について整理した。主には、地下水位の上昇と周辺の開発等による荷重条件の変化が変状の原因と考えられる。

地下水については、長期的な変動の予測には困難な点があるが、設計に採用する地下水位にはある程度余裕のある値の採用が望まれる。想定した地下水位に対して、どのような設計を行うかが重要な点であるが、トンネルの構造には、一般に排水型トンネルと非排水型トンネル（ウォータータイトトンネル）があり、立地条件や工法に配慮して選定することが重要である。排水型トンネルは、山岳トンネル工法で多く適用されており、シート防水は、トンネル内部への漏水防止と二次覆工打設時の緩衝材（アイソレーション）として重要な機能を有している。ウォータータイトトンネルは、シールドトンネル工法において実績が多く、都市域での地下水位変化を抑制して環境保全を図ることが重要であり、地下水压に対して有効な円形状を有していることやセグメントが高い耐荷力（高強度コンクリートや配筋等高品質が得られる）を有しており、適宜、土圧や水压に対して設計することが可能なことによる。山岳工法におけるウォータータイトトンネルは、地下水位等の周辺環境の制約が厳しい都市域の地下鉄において採用されている事例^{10), 11)}があるが、一般には5心円などの馬蹄形の形状が中心の山岳工法で、水压に対抗する構造とするためには、トンネル形状や覆工厚と配筋について十分な検討が必要であるとともに、鉄筋の継手や防水シートの密着等、施工も高度な技術が要求されることから、採用される条件や施工範囲が限定されているのが実態であり、非排水型トンネルの設計・施工には技術的な課題が多い。

都市域での開発行為によって、構造物への載荷、除荷が繰り返されることから、構造部材厚や配筋を将来の荷重変化に対応できるよう十分な検討を行う必要がある。特に都市域のトンネルでは、地形改変や近接構造物の影響を受けるなどの荷重変化が予想される場合が多い。

(b) 構造物の劣化への対応

構造物の劣化の要因は、主に漏水や荷重の変化であり、漏水による構造部材（セグメント等）の劣化や施設の腐食が生じている。これらを抜本的に解決するためには、非排水型トンネル（ウォータータイト）の計画を行うことが必要であるが、構造部材が水压に耐えうる設計が必要なことや防水シート等の止水材料が必

要となるため、初期投資が大きくなる。このため、工法の検討や設計に関する注意事項は、前述の通りであるが、ウォータータイトトンネルに関しては、漏水が無くなることによる維持管理費用の縮減や環境保全といった貴重な利点があることに配慮しなければならない。

東京湾横断道路（アクアライン）では、類似の海底トンネルの事例（アムハムド・ハムディトンネル¹²⁾）を参考に、30年間のライフサイクルコストの試算から、シールド工法に併用して防水シートを設置¹³⁾している。このほか、都市域のトンネル^{10), 11)}では、地下水低下による環境保全にも配慮して止水構造の採用を計画している。こうした事例では、対象地盤が地下水低下に伴い圧密沈下を生ずるかが問題であり、多くの場合、沖積層（あるいは洪積層の正規圧密粘土）を対象とした地山条件では地下水低下に伴う広域的な地盤沈下の影響が懸念されることから非排水型トンネルの計画が必要となる。

一方、青函トンネルでは、その地山条件の過酷さや施工法などから、海底トンネルとして、排水型トンネルとなっている。このため、イニシャルコストは排水トンネルが小さいものの、現状、青函トンネルでは日量約30,000tの湧水をポンプにより揚水するなどランニングコストがかかることや維持管理が構造物の安定を図るために重要な比重を占めている¹⁴⁾。

(c)地山条件（地山分類）評価への対応

地山条件の評価については、適切な地山分類を行うことが重要である。しかし、トンネルは線状構造物であり、全延長にわたって詳細な調査を実施することは困難であり、弾性波探査等を中心とする物理探査手法に頼らざるをえないのが現状である。弾性波探査は、地層の構成が浅い部分から順次速度を増していくことを前提としており、中間に速度の低い地層が分布する場合や、亀裂の評価と言った点で、地山を適切に評価するには問題がある場合がある。

最近の研究では、地山の強度と岩石の強度を分けて考えることの重要性が指摘¹⁵⁾されている。統計的な分析の結果、問題が生ずる岩石とそうでない岩石とに区分ができ、泥質な岩石の場合には大きな変位が生じ、安定性が悪くなる問題点がある。即ち、強度が粘着力に依存する地質（泥岩・頁岩、粘板岩）では、岩石は応力解放されると、非常に劣化が早いために、大きい内空変位が生ずる。

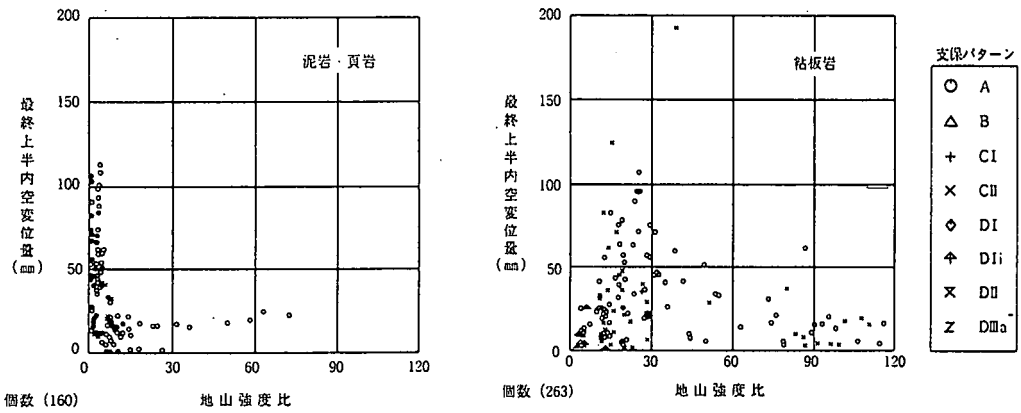


図-3.2 地山強度比と最終上半内空変位量相関図(2)¹⁵⁾

また、我々は、経験的には、これまでの地山分類の運用から、中生層などの古い年代の亀裂の発達する地山（粘板岩や片岩）では、弾性波速度以外に亀裂係数の評価が重要であることを認識している。

したがって、砂質地山と粘土質地山では、挙動が異なり、岩の種類によって挙動を推定する手がかりとする必要があり、地山を適切に評価することが重要と考える。最近、亀裂性の岩盤では、一般に地山強度比を換算するための一軸圧縮強度が得にくいことから、弾性波により強度を推定する試み¹⁶⁾もされている。粘性

土質の地山では、岩石の強度ではなく、トンネル掘削時の挙動を左右する地山強度を適切に把握することが必要であり、こうした点を地山分類に適用することにより、トンネルの適切な支保パターン¹⁷⁾の決定やインバートの必要性を設計・施工時に的確に判断することが重要である。

また、地山条件の中の特殊な事例として、地山が流紋岩等の場合、湧水が酸性水である場合が多く、覆工コンクリートの溶出を生ずることがあり、建設後に大規模な改築^{17), 18)}を強いられる場合がある。

以上のように、設計・施工時の地形・地質等地山条件に関する適切な判断がトンネルのライフサイクルコストを縮減するためには重要であり、今後、維持管理段階での情報を地山分類等の設計資料に的確に反映させることが重要である。

(d)点検・清掃作業の省力化

点検・清掃作業の省力化の方法としてロボットによる自動化があげられる。これらの設備は設置スペース、移動用のレール、メンテナンスヤードなど、トンネルの本体設計当初から考慮する必要がある項目である。

東京湾アクアライン¹⁹⁾では、サービス向上を目指す観点から、交通の障害となる通行規制を抑制し、維持管理作業の効率化と作業環境の改善を目的として、壁面内装と照明灯具の自動清掃車両を設置した。自動清掃車は、あらかじめ設置されレールにより壁面に沿って移動し、壁面と灯具を清掃する。清掃労力は自動化により大幅に省力化され、交通規制も不要となった。また、維持管理費の削減とともに作業員の安全面でも有利である。こうした設備の導入は、初期投資が大きく、維持管理費と比較検討を必要とする。

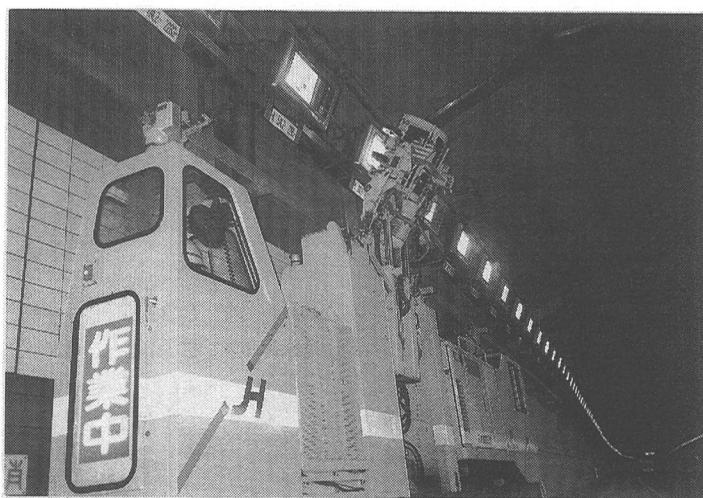


写真-3.2 自動清掃車両（灯具清掃中）（日本道路公団提供）

4 まとめ

トンネルの維持管理段階における問題点を整理し、トンネル設計に配慮する点として、設計条件としての地下水位の考え方、トンネルの排水構造（排水、非排水）や適切な地山条件の判断によるインバートの設置等について整理した。これらは、維持管理を合理的かつ効率的に行うためには重要な項目であり、設計時に十分配慮することにより、構造物のライフサイクルコストを縮減できる可能性を持っている。

ライフサイクルコストは、いわゆる施設の企画・計画から施設の運営・解体に至るまでの全プロセスに要する費用のことであり、合理的な施設整備を行うためには、ライフサイクルコストによる維持管理等の費用を考慮することなしに今後の施設整備はありえないといっても過言ではない。今後、こうした問題点を整理し、初期投資で整備すべき構造物の耐久性（メンテナンスフリーの必要性など）や設計に考慮すべき条件（環

境・安全、社会・経済情勢)を明確にすることが重要である。

本論文は、土木学会地下空間研究委員会維持・管理小委員会の活動の中で取りまとめたものである。論文の作成に当っては、同設計WGの梨本 裕(前田建設工業株式会社土木設計部)、加納竜夫(パシフィックコンサルタンツ株式会社施設部)両氏にご協力を頂いた。

参 考 文 献

- 1)建設省：社会資本の維持更新・機能向上技術の開発 報告書，平成8年10月
- 2)土木学会：トンネル標準施工方書(山岳工法編)・同解説
- 3)特集 地下水トラブルを防げ，日経コンストラクション，1996.8.9
- 4)ズームアップ トンネル 総武トンネル改修工事(東京都) コンクリート板を二次覆工型枠に，日経コンストラクション，1990.12.14
- 5)中村，松枝：地下鉄道維持管理・補修上の問題点，基礎工，1989.4
- 6)猪熊：道路トンネルの緊急点検と今後の維持管理，トンネルと地下，vol.21，No.5，1990，土木工学会
- 7)国田，竹俣，役田：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧 大谷狼煙飯田線 木の浦トンネル，トンネルと地下，vol.24，No.11，1993
- 8)ズームアップ トンネル 俵坂トンネル地山膨張対策工事(長崎県，佐賀県)，日経コンストラクション，1997.9.26
- 9)JTA 保守管理委員会：建設・保守管理へのフィードバック(2)，トンネルと地下，vol.29，No.6，1998
- 10)萩野，川原子，谷畑：ウォータータイトトンネルに挑戦 横浜市地下鉄1号線，トンネルと地下，vol.20，No.11，1989
- 11)梅田，井戸，出口，若林：環境保全対策を十分考慮した大規模都市トンネルの施工 京都地下鉄烏山線延長工事，トンネルと地下，vol.28，No.2，1997
- 12)エジプト海底トンネルの劣化を防げ，日経コンストラクション，1993.10.8
- 13)東京湾をつないだ男たち第三話，日経コンストラクション，1997.7.25
- 14)坂井，高橋，山田，鳴海：背函トンネルの挙動計測ー海底区間の維持管理ー，土と基礎，vol.45，No.5，1997
- 15)今田：NATM20年 我々は何を学んだか，ハイウェイ技術，No.9，1997年12月
- 16)中田，三谷，吉塚：インバートの設置基準に関する研究，トンネル工学研究論文・報告集第6巻，pp.141～146，1996
- 17)鈴木，諏訪：三国トンネルにおける酸性湧水による巻き立てコンクリートの侵食とその対策，セメント・コンクリート，No.292，1971.9
- 18)須藤：三国トンネルの修繕工事，土木施工，vol.20，No.12，1979.11 臨時増刊
- 19)東京湾横断道路株式会社：東京湾アクアライン，1997.6