

トンネル維持管理において LCC 評価を実現するための予測解析技術

PREDICTION SIMULATION TECHNOLOGY FOR ANALYZING LIFE CYCLE COST IN A TUNNEL MAINTENANCE MANAGEMENT

松田貞則*・桜井達朗*

Sadanori MATSUDA and Tatsuro SAKURAI

In this paper, a finite element analysis is conducted to investigate the long-term stability of a cracked tunnel due to creep behavior of surrounding ground and the effectiveness of corresponding remedial works. The material parameters involved in the model are determined through a series of laboratory tests. Particular attention is paid to the selection of a suitable remedial work for the cracked tunnel. By comparing the calculated results with the field observation, it is found that the approach for assessing the long-term stability of the cracked tunnel and the effectiveness of the remedial works is quite accurate and applicable.

Key Words : *mountain tunnel, maintenance-repairs, reinforcement design, life cycle cost, time dependency, finite element method*

1. 序論

1999 年のトンネル覆工コンクリートの剥落事故を契機に、既設トンネルの維持管理のあり方や土木構造物の耐久性の考え方が盛んに議論されている。本来、トンネルは、他の構造物に比べ長い耐用年数を有する。50 年以上もの経年を積んだトンネルでも、定期的な維持管理のもとで安全な空間利用の一躍を担っているトンネルは多数ある。

ところが、わが国のトンネルは、地圧などの外力が作用しやすい地形・地質・地下水条件下に置かれている場合が少なくない。このため、トンネル覆工におけるひび割れや変形等の変状がしばしば問題になり、対策を余儀なくされる場合もある。また、吹付けコンクリートとロックボルトを主な支保とする山岳工法 (NATM) 以前のトンネル (木製矢板工法) では、トンネル覆工の背面に空洞が形成されやすく、変状を助長する要因になっていることが、経験的に知られている。

トンネル覆工におけるひび割れや変形の進行性には、地山の時間的な強度低下 (風化劣化、クリープなどの時間依存性) が影響しているものと考えられる。したがって、今後、既設トンネルの長期にわたる安全性あるいは機能に関する検討を行う場合には、時間の要素を考慮した評価が必要になる。すなわち、あるトンネルが維持すべき機能とその供用期間、耐用年数を明確にしたうえで、その期間中のトンネルの安全性、トータルとしての経済性を評価することが求められている。これは、LCC (ライフサイクルコスト) を考えなければならないことを

意味し、そのコストを経済的に保つためには、維持管理計画技術 (LCC 評価) が非常に重要な要素になる。

このような状況を踏まえて、本論文では、図-1 に示すようなライフサイクルコストを具体的に評価するうえで必要になるトンネルの経時的な劣化特性および補修・補強工法の機能維持あるいは機能改善に対する経時的な効果を定量的に評価するため、地山とトンネル覆工との相互作用を時間ステップでシミュレーション可能な数値解析手法^{1),2)}を実際の変状トンネルに適用し、その有効性を検証したので、ここに紹介する。

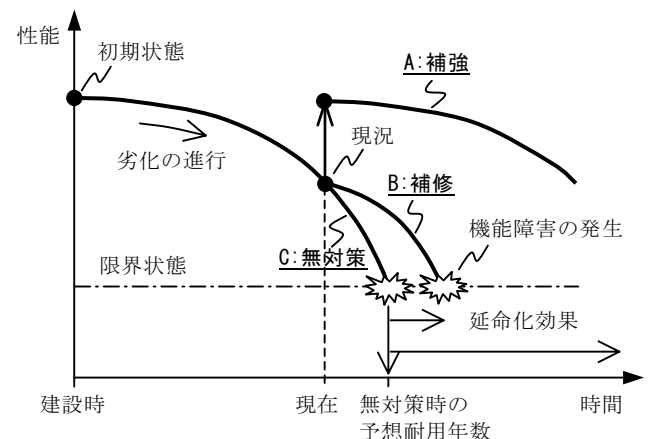


図-1 トンネルの経時劣化曲線と対策効果の概念

2. モデルトンネルの概要

図-2 は、本論文で対象にしたモデルトンネルの地質構造およびトンネル形状を示したものである。モデルトンネルは、昭

* 社会環境エンジニアリング事業部 ライフサイクルマネジメント部

和 39 年に運用を開始した水力発電所の水路トンネルで、土被りは約 400m、全延長 6,200m の内、ひび割れによるトンネル覆工の変状が著しい区間は約 100m である。変状区間の地質は、中古生代の粘板岩層に貫入したと考えられる石英斑岩層で占められ、石英斑岩の上部は、第三紀の溶結凝灰岩層に不整合に覆われている。石英斑岩は熱水変質を受けており、不整合面周辺の溶結凝灰岩層、石英斑岩層ともに風化が進んでいる。また、完成から約 30 年後の平成 6 年に実施したボーリング調査によれば、トンネル周辺には同心円状に約 2m の範囲で地山の緩み域があり、トンネル覆工の天端背面には、高さ 20~30cm ほどの空洞が確認されている。

トンネル覆工のスプリングライン~アーチ肩付近には、完成して間もない時期(昭和 40 年)から幅 1~3mm 程度の縦断ひび割れが発生し、ひび割れの補修後(昭和 43 年)も進行が確認されている。図-3 は、平成 11 年に目視点検した際のひび割れ展開図であるが、右アーチ肩~天端クラウン付近においては、ずれ幅 8~13mm の段差にまで変状が進行している。

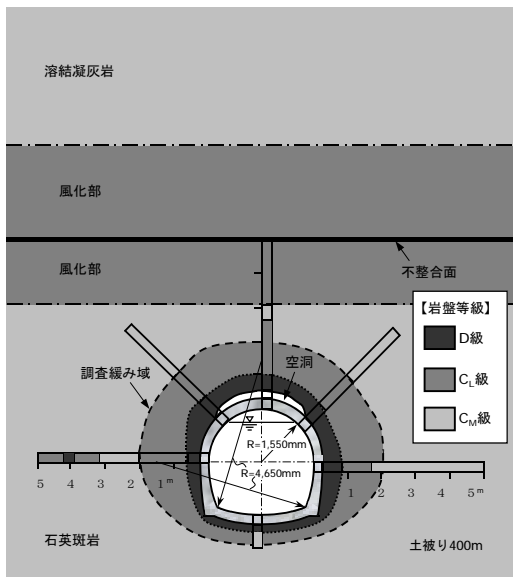


図-2 解析トンネル断面周辺の地質状況(平成 6 年調査)

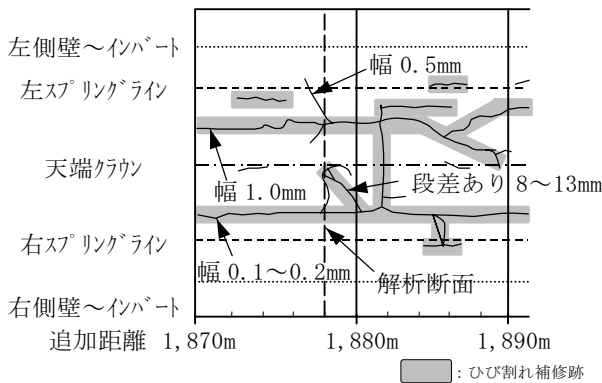


図-3 解析断面近傍のトンネル変状状況(平成 11 年調査)

3. トンネル長期変形解析

(1) 室内試験結果及び材料パラメータの設定

解析に用いる地山の材料パラメータは、通常、定ひずみ速度三軸圧縮試験および三軸クリープ試験で得た値より決定するが、本事例では、試験数量の制約もあり、多段階三軸圧縮試験、一軸クリープ試験で得られた特性値より決定した。

図-4 は、有限要素解析で使用する解析メッシュで、トンネルにおいておおむね対称な地質構造であるため、図に示す 50x50m の範囲を解析領域とする。地山の初期応力場については、解析領域内で一様であると想定し、土被り高さ分(400m)の静水圧状態(9.6MPa)とする。また、図-4 中の G4 層はトンネル掘削に起因した長期にわたる劣化進行の影響を考慮して、応力・ひずみの非線形性および時間依存性を取り扱う。それ以外の地山については、線形弾性体とした。これら地山の材料パラメータは、表-1、2 に示す。

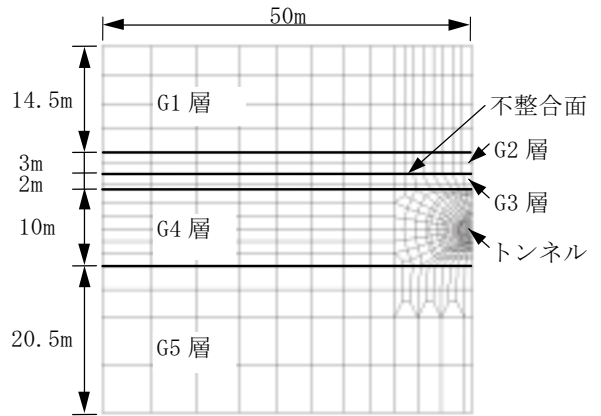


図-4 解析メッシュ図(ハーフモデル)

表-1 地山材料定数(弾粘塑性体:G4層)

E (MPa)	弾性係数	500	a	時間依存性パラメータ	0.959
ν	ポアソン比	0.25	C		0.565
b (MPa)	塑性ポテンシャルパラメータ	0.87	M_f^*	残留強度時の応力比及び除荷・再載荷の初期接線勾配	1.15
σ_{mb} (MPa)		18.0	G'		45.4
M_m	最大体積圧縮時の応力比	1.25	τ	応力履歴パラメータ	90,000

表-2 地山材料定数(線形弾性体)

地層名		G1	G2	G3	G5
E (MPa)	弾性係数	4,000	1,500	1,500	1,900
ν	ポアソン比	0.20	0.25	0.25	0.20

表-3 部材定数(部分線形弾性体:bi-linear型)

部材名		アーチ・側壁 (巻厚 15cm)	インバート (巻厚 35cm)	支保工 (H-100)	ロックボルト (D25)
E (N/mm ²)	弾性係数	2.66e+4	2.66e+4	2.1e+5	2.1e+5
I (cm ⁴)	断面二次モーメント	281.3	3572.9	383.0	0.0
A (cm ²)	断面積	15.0	35.0	21.9	5.067
My (kN·m/m)	ひび割れ発生モーメント	7.61	42.22	—	—

(2) トンネル覆工のモデル化及び材料パラメータ

トンネル覆工および補強セントル(H形鋼)は薄肉な部材であるため梁要素でモデル化し、ロックボルト(全面定着式)は軸力伝達だけを考慮して棒要素でモデル化する。表-3に各部材の材料パラメータおよび幾何パラメータを示す。また、表-3中の M_y はひび割れ発生モーメントを表し³⁾、部材に働くモーメントが M_y を超過した場合、部材の初期の曲げ剛性EIは1/1,000に低減されて、トンネル覆工コンクリートは劣化することになる。

(3) 過去の変状履歴と解析ステップ

図-5は、モデルトンネルの建設工事記録や坑内観察記録をもとに設定した解析ステップである。モデルトンネルでは、過去の変状対策として、完成から32年後にH形鋼によるトンネル覆工補強、さらにその3年後には、裏込め注入工によるトンネル覆工と地山との密着性の改善およびロックボルト(L=3m、8本/m)による地山補強を行っており、解析では、これらを計5ステージで再現している。

	掘削前	掘削応力解放+覆工設置	通水後1年 (昭和40年)	通水後3年 (昭和43年)	通水後10年 (昭和49年)
解析モデルの概念図					
	ステージ(0)	ステージ(1)	ステージ(2)		
解析条件	<ul style="list-style-type: none"> 土被り400m分の静水圧状態と想定し初期応力条件として設定する。 初期平均主応力 $\sigma_{m0}=9.6\text{MPa}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 8ヶ月間の時間経過に伴う地山の時間依存性挙動を解析する。 その後、覆工コンクリート(天端~アーチ・側壁)を追加する。 インパートは9ヶ月遅れて追加する。 	<ul style="list-style-type: none"> 時間経過に伴う地山の時間依存性挙動を解析する。 トンネル覆工に働く部材の断面力が、ひび割れ発生モーメントに達した場合には、曲げ剛性を1/1,000に低減する。 	<ul style="list-style-type: none"> ひび割れ補修による状態変化は考慮しない。 時間経過に伴う地山の時間依存性挙動のみを解析する。 	<ul style="list-style-type: none"> 時間経過に伴う地山の時間依存性挙動について逐次ステップ解析する。
変状・対策履歴	<ul style="list-style-type: none"> 石英斑岩の上部に溶結凝灰岩が堆積している。 溶結凝灰岩と石英斑岩との不整合面付近の風化、貫入岩である石英斑岩自体の変質が認められる。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル周辺地山は固結度が低く脆弱であるため、地山の押し出し現象やトンネル天端背面地山の小崩落(背面空洞の形成)が生じたものと推察される。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地では、アーチ左右肩部に幅1~3mm程度の縦断ひび割れが発生する。 トンネル天端背面空洞の影響で、トンネル覆工に不均一な地圧が作用したものと想定される。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地では、アーチ左右肩部に生じた縦断ひび割れについて補修を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地では、アーチ左肩部に縦断ひび割れが再発生する。
	通水後17年 (昭和56年)	通水後32年 (平成8年)	通水後35年 (平成11年)	通水後36年 (平成12年)	
		ステージ(3)	ステージ(4)	ステージ(5)	
	<ul style="list-style-type: none"> 時間経過に伴う地山の時間依存性挙動について逐次ステップ解析する。 	<ul style="list-style-type: none"> 仮受け支保工相当(H-100)の梁要素を追加し解析する。 	<ul style="list-style-type: none"> 背面空洞部にモルタル相当の要素を追加し解析する。 また同時に、地山内に棒要素にてロックボルト(L=3m)を追加する。 	<ul style="list-style-type: none"> 1年間の時間経過に伴う地山の時間依存性挙動を解析し、最終的な応力・変形状態を把握する。 	
	<ul style="list-style-type: none"> 現地では、アーチ右肩部に縦断ひび割れが再発生する。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地では、仮受け支保工(H-100)を設置することで最初の補強対策を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ひび割れ補修を実施。 空洞充填工を実施。 ロックボルト補強工(L=3m・8本/断面)を実施。 計測を開始する。 	<ul style="list-style-type: none"> 約1年間分の計測データが蓄積される。 	

図-5 解析対象としたモデルトンネルの変状・補強履歴と解析ステップ

(4) 解析による現況の再現性

図-6 は、完成からのトンネル覆工に発生するモーメントの経時変化を示したものである。完成直後からトンネル覆工の背面に空洞が存在した場合、アーチ肩 45°と天端クラウンについては完成から約 2 ヶ月後に、スプリングラインについては約 6 年後にひび割れ発生モーメント M_y に達することがシミュレーションされる。図-7 は、完成から 2 ヶ月後におけるトンネル覆工のモーメント分布で、アーチ肩 45°と天端クラウンにモーメントが集中している状態がよく分かる。現地の坑内観察記録によれば、完成から 1 年後の点検時に、左右アーチ肩の縦断方向に幅 1mm 程度のひび割れが確認されたと記録されており、シミュレーションによって得られたひび割れ発生位置と時期は、実際の状況とよく一致している。

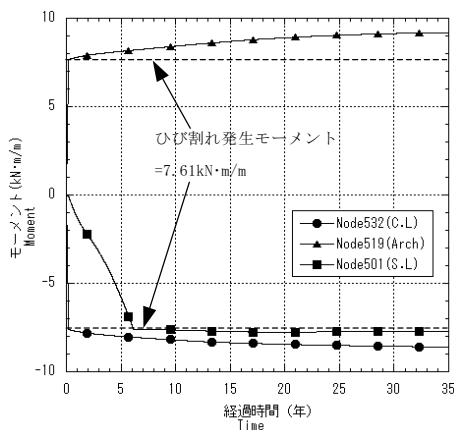


図-6 トンネル覆工に発生するモーメント経時変化

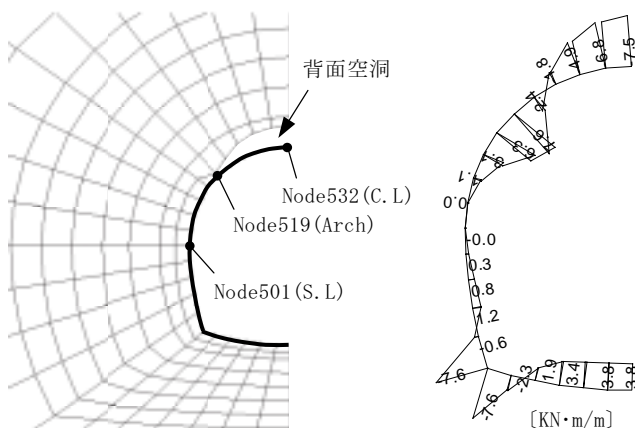


図-7 トンネル覆工に発生するモーメント分布 (完成後 2 ヶ月)

本研究では、地山の劣化進行状況を残留強度への到達度合いで評価するために、新たな状態量として、劣化係数 R を図-8、式(1)のように定義し、解析結果を考察した。劣化係数 R は、地山の劣化進行の度合いを表すのに適した応力履歴比 η^* の現在値と残留強度状態における値 M_f^* との比であり、 M_f^* は表-1 に示してある。

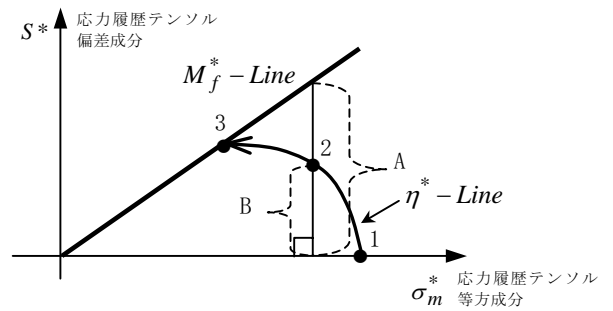


図-8 劣化係数 R の定義⁴⁾

$$\text{劣化係数 } R = \frac{\eta^*}{M_f^*} = \frac{B}{A} \quad (1)$$

図-9 は、シミュレーションによって得られた完成から約 30 年後の劣化係数 R の分布である。劣化係数 R は緩み域の範囲およびコア観察をもとに決定した岩盤等級とよく調和しており、地山の緩みに関する力学的な状態量を表す指標として有効であることが分かる。さらに、解析の結果は、図-11 に示す計測データともおおむね整合する結果を示しており、図-1 に示す初期状態～現況までのトンネル劣化プロセスを再現しているものと考えられる。

4. トンネル補強効果に関する将来予測評価

(1) 解析内容

一般に、変状トンネルの補強工法は、地山の変形の進行とともに効果を発現するため、地山の変形特性に大きく依存する。しかしながら、従来から地山の劣化・変形特性に関する将来予測評価が困難なため、設計実務では、既往の類似事例に基づく経験的な手法が数多く利用されている。

そこで、本論文では、変状トンネルの補強対策の実績として事例の多い、①補強セトル(H-100)、②裏込め注入、③ロックボルト(L=3m)の計 3 工法を対象に、先のモデルトンネルを用いて予測シミュレーションを行い、地山の劣化の進行性およびトンネル内空変位に与える影響を定量的に明らかにする。シミュレーションでは、完成から 32 年後の時点で補強した場合を設定し、それぞれのその後の 30 年間を将来予測している。

(2) 解析による補強工法効果

図-12 は、偏圧挙動が顕著なアーチ肩 45°背面の地山要素を対象に、劣化係数 R の経時変化を補強工法別に示したものである。また、図-13~14 は、図-7 に示す天端クラウン (Node532) およびアーチ肩 45° (Node519) におけるトンネル内空変位の経時変化をそれぞれ示したものである。本事例では、これらの図より、ロックボルトと裏込め注入とを併用した方法が、トンネルを補強するうえで機能的に最も有効であることが分かる。

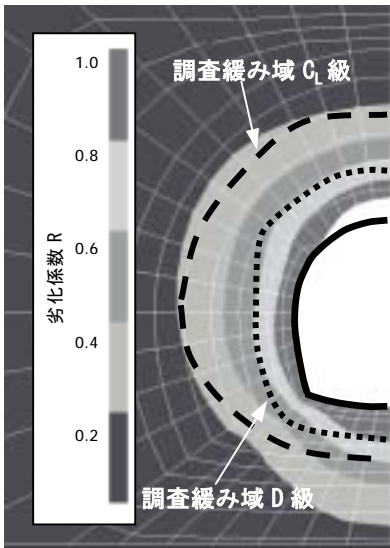


図-9 地山緩み域(完成後 30 年)

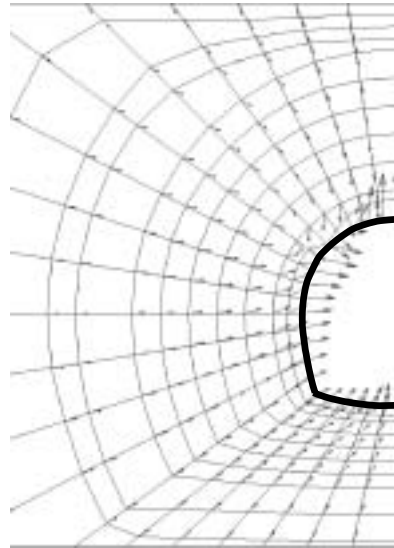
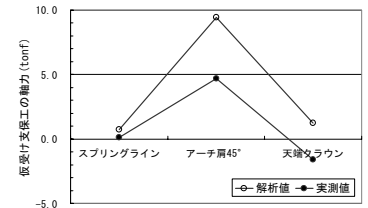
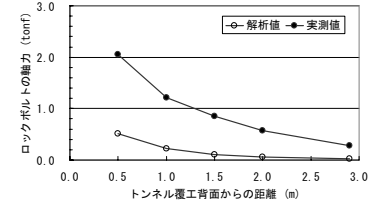


図-10 変位ベクトル(完成後 30 年)



(a) 仮受け支保工の軸力



(b) ロックボルトの軸力 (S.L 配置)

図-11 現地計測データとの比較

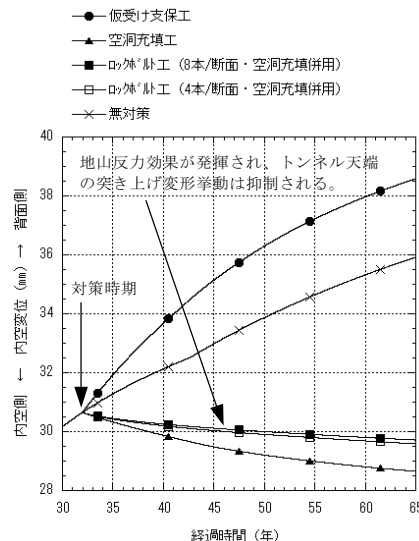
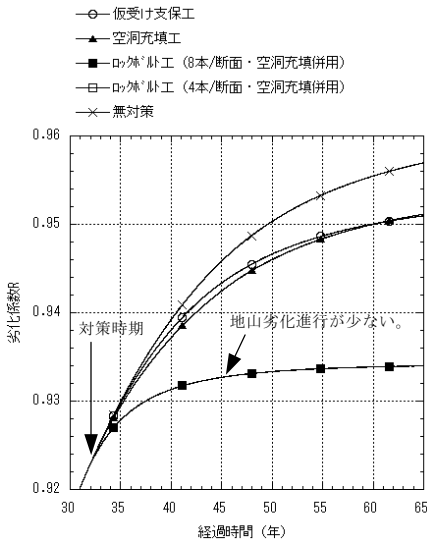


図-13 内空変位の経時変化(天端クラウン)

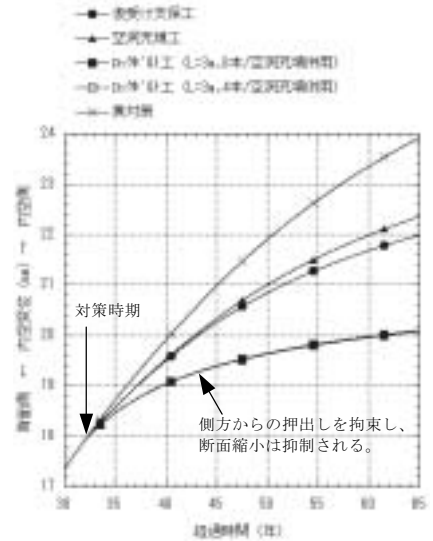


図-14 内空変位の経時変化(アーチ肩 45°)

図-12 劣化係数の経時変化(アーチ背面地山)

また、シミュレーションによれば、天端と側壁足つけ付近のロックボルトを省略した場合(L=3m, 4本/m)でも、その補強効果に有意な差はなく、地山の変形挙動に応じてロックボルト配置設計を合理化し得ることが示唆される。補強区間を約100mとした場合、ロックボルトの本数削減による工事コストの縮減効果は、直接工事費でおよそ20百万円減になる。ここで対象にした発電用の水路トンネルの場合には、工事期間中の断水による発電停止は収益性の低下に少なからず影響を及ぼすため、工期短縮は工事の時間的コストの低減にも寄与するなど、トンネル補強対策の費用-便益効果の改善に向けた本数値解析手法の積極的な利用が期待できる。

5. 結論

これまでの検討によって得られた主な結論は、つぎのようにまとめられる。

- ① モデルトンネルを対象に、現況までの過去30年間をシミュレーションした結果は、トンネル覆工に発生した実際のひび割れ位置および時期、計測データとおおむね整合し、トンネル周辺の緩み域の範囲ならびにコア観察をもとに決定した岩盤等級ともよく調和している。したがって、本論文で用いた多段階三軸圧縮試験および一軸クリープ試験の結果は、地山の長期にわたる劣化・変形特性を再現するための材料パラメータとして適当であることが分ると同時に、ここに適用した数値解析手法の有効性も明らかになった。
- ② 補強後から将来に向けた30年間の予測シミュレーションによると、裏込め注入とロックボルトによる補強は、地山の劣化およびトンネル覆工の変形を非常によく拘束していることから、本事例では、機能的に最も有効な補強方法であることが分かる。

- ③ 本論文で用いた劣化係数 R は、地山の劣化進行状況のみならず、トンネル全体の安定性に支配的な地山の限界状態を明確にするうえで有効な指標になるものと考えられ、補強・補修の要否や対策規模がより的確に評価できるものと期待される。これにより、過剰な対策が避けられるなど、修繕費に対する投資基準の明確化や工事コストの縮減に寄与するものと考えられる。
- ④ 特に、トンネルの補強規模が大きくなると想定される事例であれば、費用-便益効果の改善に向けた本数値解析手法の積極的な利用が期待できる。今後も、実事例を対象に検証を重ね、トンネル維持管理において LCC 評価を実現するための実務的利用に向けた整備を進めていきたい。

参考文献

- 1) T.Adachi, F.Oka, F.Zhang: An FEM analysis of tunnel excavation based on the constitutive model with strain softening, 土木学会第 47 回年次学術講演会, 1992, pp.716-717
- 2) 岡二三生:地盤の弾粘塑性構成式, 森北出版, 2000
- 3) 松岡茂, 益田彰久, 松尾庄二, 柳博文: ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する研究, 土木学会論文集, No.554/III-37, 1996.12, pp.147-155
- 4) 関根裕治, 兵藤英明, 松田貞則: クリープ挙動を示す軟岩トンネルの補強工法効果に関する評価, 電力土木, No.299, 2002.5, pp.19-24