

高速道路トンネル点検結果を用いたトンネル覆工コンクリートの劣化要因の推定

宮地 智仁¹・海瀬 忍²・林 久資³・進士 正人⁴

¹学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail:i051ve@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

³正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁴フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

我が国の老朽化したトンネルの増加などから高精度かつ効率的なトンネル覆工の点検が強く求められている。東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下“NEXCO”と称す）は高速道路トンネルの点検として、車両による画像点検と近接目視による点検を組み合わせ実施している。そこで、NEXCOが管理する高速道路トンネルの内43,634スパン分の覆工点検データを使用して2種類の点検の間の変状について調査を行った。供用開始時期から点検までの年数とTunnel lining Crack Index（以下“TCI”と称す）を用いて分析を行ったところ、供用初期に外力評価点が大きく増加するスパンが存在することがわかった。これは、ひびわれの増加は比較的軽微であることが分かった。また、そのスパンの健全度は概ねIまたはIIであり損傷程度は軽微なものであることが確認できた。

Key Words : tunnel lining Inspection, Tunnel-lining Crack Index, tunnel lining concrete

1. はじめに

土木構造物の維持管理は我が国における重要な課題である。現在、日本に存在する既設トンネルは約1万本存在している。さらに、建設後50年以上経過するものがすでに20%程度存在し、今後急速に増加すると見込まれている。さらに、少子高齢化による熟練点検技術者不足も懸念されている。その中で、NEXCOが管理している高速道路トンネルでは覆工点検画像取得システムを用いた点検（以下、“点検A”と称す）と点検A実施後に行われる点検技術者による近接目視点検（以下、“点検B”と称す）の2種類のトンネル覆工点検を組み合わせた定期点検を行っているものの、将来にわたり、覆工点検の高精度化が望まれている。そこで、点検Aと点検Bのそれぞれの特徴を捉えるため、両点検の評価点を比較した。図-1は、両点検時に算出される評価点の分布を示したものであり、直線（赤）は評価点が一致する直線である。この図に着目すると、点検Aと点検Bの評価点は概ね一致するものの、ばらつきが生じている領域や、

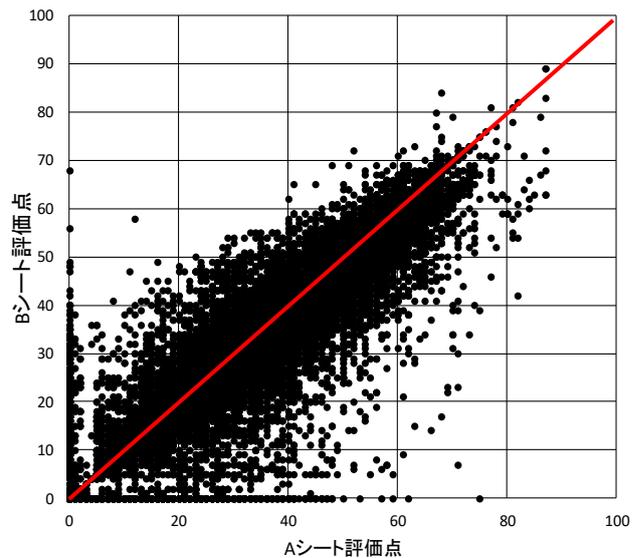


図-1 定期点検での外力評価点分布

両点検の評価点に十数点の差が認められるトンネルスパンも存在することがわかった。そこで、評価点の点数差

やばらつきの要因について検討したところ、両点検は実施日が異なっており、①点検日間における変状が生じた可能性や、②覆工点検画像取得システムを用いた点検 A と技術者による近接目視点検の点検 B 点の点検手法の違いに起因した可能性が考えられる。

これらの可能性について言及した既往研究¹⁾として、著者らは、NEXCO が管理するトンネルを対象に、同一トンネルの直近の点検 A と点検 B の採点結果を比較し、A シートおよび B シート片方のみしか点数が付かない例があることを示し、覆工画像から展開図作成時にひびわれの確認漏れの事例、点検 A を実施後、点検 B を実施するまでに新規の変状発生により、B シートに点が付いている事例が考えられること。また、点検 A の導入当初の診断結果は、覆工の縞模様の誤認等が要因の可能性であることを解明している。つまり、上述した①および②の発生要因については言及されている。しかしながら、①の点検日間における変状が生じた可能性のうち、点検間に変状が進行することは、点検 A と点検 B の 2 段階点検システムとしては課題となる。

トンネルの変状については周辺地山の影響、地震等の外力、経年劣化によって生じるが、図-2 のように小規模なものから大規模なものまでトンネルの変状原因は多岐にわたる。そのため、筆者らは、過去に NEXCO が管理するトンネルを対象に、変状の要因の一つである点検時の気温差に着目し（小規模な変状）、点検間の気温差が大きいトンネルスパンの点検結果を比較したが、点検間の大きな点数差、ばらつきは生じる可能性が低いことを考察した³⁾。一方で、点検 A から点検 B までの点検日間の大きな変状の発生については、調査していない。図-1 に再び着目すると、新規の変状が発生しているケースも存在する可能性がある。そこで、本論文では NEXCO が管理する高速道路トンネルの定期点検結果に着目し、評価点差が大きいものを中心に分析を行い、点検 A から点検 B までの点検日間の変状の進行性について調査した。

2. NEXCOによるトンネル定期点検の概要⁴⁾

先にも述べたように、NEXCOではトンネルの定期点検として点検Aと点検Bの2種類の点検を実施している。

点検Aは、覆工の表面画像を外部光等を用いた覆工表面画像取得システムにより取得し、ひびわれ展開図を作成し、ひびわれ指数と観察項目より変状の程度を表す評価点を算出することで、特に重点的に点検を行うスパンを抽出する点検である。

点検Bは点検Aの結果に基づき、技術者が近接目視を行う点検である。道路法の改訂により、現在はすべて

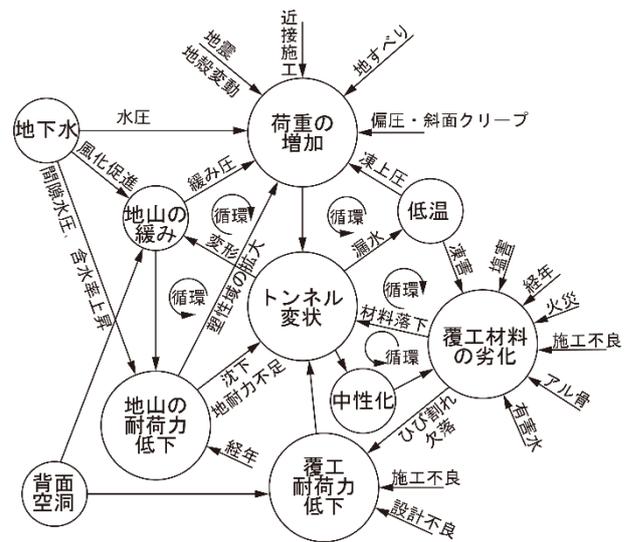


図-2 トンネル変状原因の関連図の例²⁾

詳細点検Aシート(抜粋版)					スパンNo.	
1.トンネル種別等						
2.特記事項(緊急補修・対策工検討を要する項目)						
観察項目	判定	判定区分	check	外力	はく露	備考
① 幅2mm程度のひび割れが3m以上ある	点検Bの実施			0	0	
② 幅3mm程度のひび割れがある	点検Bの実施			0	0	
③ 打ち継ぎ目に三日目型のひび割れがある	点検Bの実施			0	0	
④ J.F. 構造等遮断層周辺に放射状のひび割れがある	点検Bの実施			0	0	
⑤ 構造上問題があると判断されるひび割れがある	点検Bの実施			0	0	
⑥ モルタル系の補修材による底対置箇所がある	点検Bの実施			0	0	
⑦ 豆板(ジャンク)などがあり、浮き・はく露の危険性がある	点検Bの実施			0	0	
⑧ 外力健全度が0-2Vランクに対し前回点検時から補修補強が実施されていない	点検Bの実施			0	0	
3.データシート						
【評価は、スプリングライン間のアーチとして一括で行う】						
観察項目	判定区分	判定区分	check	外力	はく露	備考
1.ひび割れ幅・長さ・分布				0	0	
2.ひび割れの方向性				0	0	
3.パターン	なし			0	0	
	亀甲状	1m2未満		7	11	
		1m2以上		14	22	
	なし			0	0	
	閉合型	長辺20cm未満		4	12	
		長辺20cm以上		7	23	
4.エプロレッセンス	なし			0	0	
	少ない			1	1	
5.漏水	あり(対策なし)			2	2	
	あり(対策済み)			2	0	
	なし			0	0	
【外力判定】 1:30以下 II:31~59 60以上 詳細点検B実施				評価点の合計		その他
【はく露判定】 36以上 詳細点検B実施				外力	はく露	
【漏水判定】漏水ありの場合は、詳細点検B-Cの段階で確認する。				0	0	特記事項による点検
				0	100	その他の理由による点検
コメント				点検B	点検B	理由

図-3 詳細点検Aシート

のスパンの点検Bを行っている。この点検も点検Aと同様にひびわれ指数と観察項目より変状に対する評価点を算出する。そして、算出された評価点を用いて、スパンごとに健全度の評価を行う。

点検Aと点検Bのそれぞれの点検実施時には詳細点検Aシート(以下“Aシート”と称す)、詳細点検Bシート(以下“Bシート”と称す)にトンネルの各種データを記入し、ひびわれ展開図から構造的な安定性に対する評価点の外力評価点と利用者の安全に

対する評価点のはく落評価点を算出する。ここに詳細点検シートの例として図-3 に A シートを示す。A シートと B シートにおいて、各種評価点を算出する項目（図-3 データシート項目）は同一である。このシートは原則としてコンクリートの一打設長であるスパン単位で作成される。

図-3 の赤枠で示している項目である「1.ひびわれ幅・長さ・分布」，「2.ひびわれの方向性」の 2 つの項目ではひびわれ指数 TCI を利用して評価点を算出している。TCI から外力評価点へは式 (1) を用いて算出されている¹⁾。

$$y_1 = \frac{58 \times x \times 10^5}{(x \times 10^5 + 10)} \quad (1)$$

ここで、 y_1 ：外力評価点， x ：TCI である。

図-4 に外力評価点と TCI の関係をプロットした図を示す。このように外力評価点と TCI は比例関係にない。つまり、TCI の差が同じであったとしても外力評価点の差は同じにはならない。その一例を以下に示す。表-1 に TCI が 5×10^5 変化した場合の外力評価点，外力評価点差を示す。図-4，表-1 から、特に表-1 ケース 1 のような TCI の値が低い領域において、TCI を利用して評価点を算出している式 (1) が、僅かな TCI の増加に対して外力評価点が大きく増加する関係性を有していることが分かる。

外力評価点の算定に用いられている TCI⁹⁾ とは、ひびわれの密度や規模、方向を定量化する指標であるクラックテンソルを援用し覆工に発生するひびわれを定量的に把握するために提案された指標が TCI である。TCI の基礎式を式 (2) に示す。

$$F_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n (l^{(k)})^\alpha (b^{(k)})^\beta \cos\theta_i^{(k)} \cos\theta_j^{(k)} \quad (2)$$

- A：覆工コンクリートの面積 ($A=L_s \times L_a$)
- L_s ：覆工コンクリートの縦断延長（通常はスパン長）
- L_a ：覆工コンクリートの横断延長
- n ：ひびわれの本数
- $l^{(k)}$ ：ひびわれ k の長さ
- $b^{(k)}$ ：ひびわれ k の幅
- $\theta_i^{(k)}$ ：ひびわれ k の法線ベクトルが x_i 軸となす角度
- $\theta_j^{(k)}$ ：ひびわれ k の法線ベクトルが x_j 軸となす角度
- α ：ひびわれ幅の重み付けに関する係数
- β ：ひびわれ長さの重み付けに関する係数
- F_0 ：TCI の一次不変量
- F_{11} ：TCI の縦断方向成分
- F_{22} ：TCI の横断方向成分
- $F_{12}=F_{21}$ ：TCI の斜め方向成分

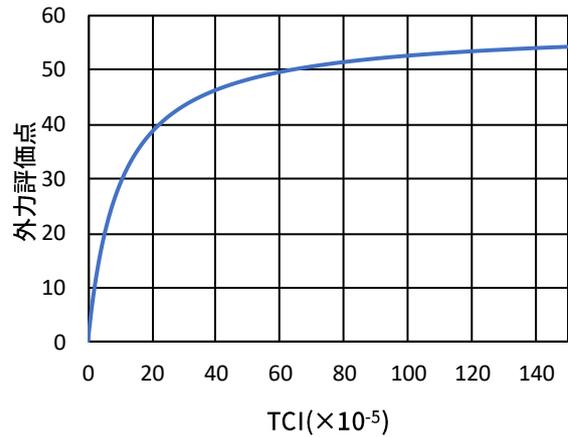


図-4 外力評価点と TCI の関係

表-1 TCI の変化による外力評価点変化の例

	TCI ($\times 10^5$)	外力 評価点	外力 評価点差
ケース1	5	19.3	9.7
	10	29	
ケース2	50	48.3	0.8
	55	49.1	

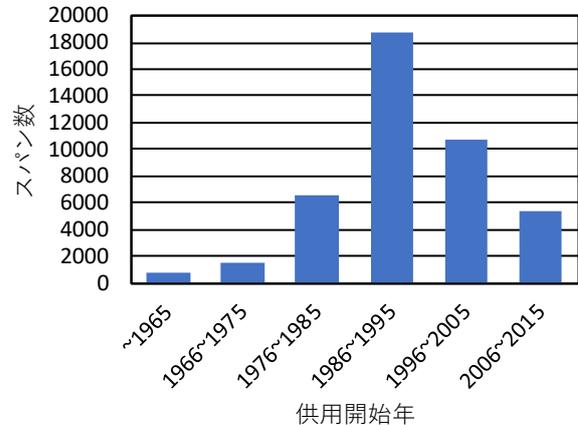


図-5 供用開始年とそのスパン数

本報告では 1 章で述べたように、NEXCO が管理する高速道路トンネルを対象とし、点検日間の変状の進行性について分析を行う。本報告で用いるデータは既往研究¹⁾で使用されたデータの一部を用いた。

本論文で使用するデータは点検 A，点検 B それぞれにおいて作成された A シート，B シート 43,634 スパン分のデータである。図-5 に本報告で使用するトンネルの供用年とスパン数を示す。図-5 から 1986 年から 1995 年に供用が開始され、2019 年現在までにおよそ 25~30 年が経過したスパンが最も多いことが分かる。ここで、点検

Aから点検Bまでにどの程度の期間（点検間隔）があるのかを示すため、図-6 に点検間隔とスパン数を示す。ここでの点検間隔とは、点検Aと点検Bの間隔であるため、道路法で規定されている点検間隔とは異なるものである。横軸に点検間隔、縦軸にそのスパン数を示している。図-6 から、点検間隔は2年未満のものが43,634スパンのうち80%を占めていることがわかった。点検A実施から点検B実施までの平均点検間隔は約1.6年である。本報告ではこのようなデータを基本に分析を行う。

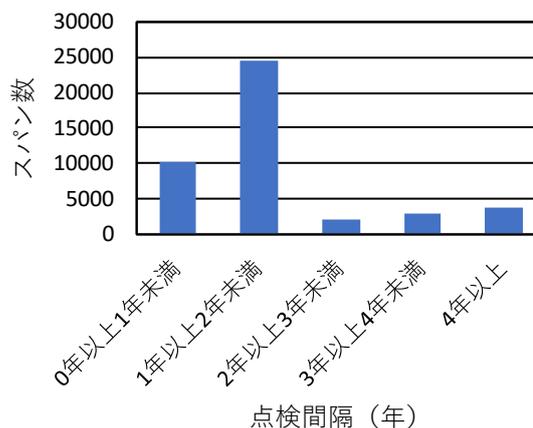


図-6 点検間隔とスパン数

3. 供用年数・点検間隔を考慮した分析

点検A, B間で外力評価点がどの程度変化するかを概観するために、全スパンのうち100スパン分のデータを無作為抽出し、供用から各点検までの年数を算出した。

図-7に外力評価点と供用から各点検までの年数をプロットしたものを示す。図-7から外力評価点に着目すると供用から10年程度までに点検Aと点検Bの結果の差が10点程度生じているスパンがあることがわかった。また、点検Aと点検Bから求めた傾き（図中黒線）が供用から10年程度までに立ち上がる傾向にあることがわかった。供用から10年程度までの比較的初期の段階でトンネル覆工が劣化することは好ましくないため、トンネル覆工コンクリートのクラックがどのように生じていたのかを把握するためにTCIに着目した分析を行うこととした。図-8にTCIと供用から各点検までの年数をプロットしたものを示す。図-7では、ひびわれのみに着目するためTCIのみを取り出して分析を行うものである。図-8のTCIに着目すると供用から10年までにTCIが2~3程度の増加に留まっていることがわかった。さらに、TCIの値として供用から10年で 10×10^{-5} 程度でとどまっていることもわかった。つまり、2章で述べたようにひびわれ指数TCIを利用して評価点を算出している式(1)が、僅かなTCIの増加に対して外力評価点が大きく増加する関係性を有しているため、得られた結果であることから、供用直後の点検Aと点検Bにおける外力評価点の傾きは、クラックの進展としては軽微なものであると考察出来る。

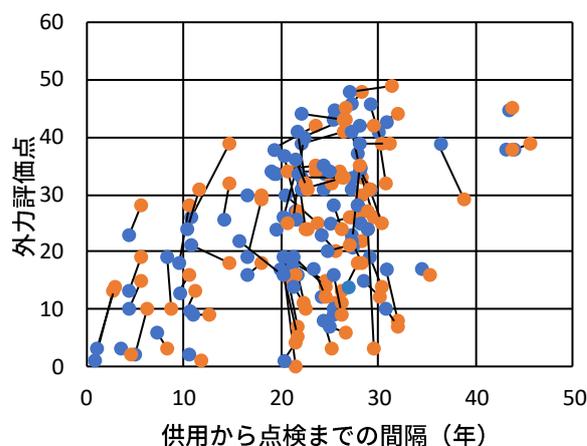


図-7 外力評価点と各点検までの年数

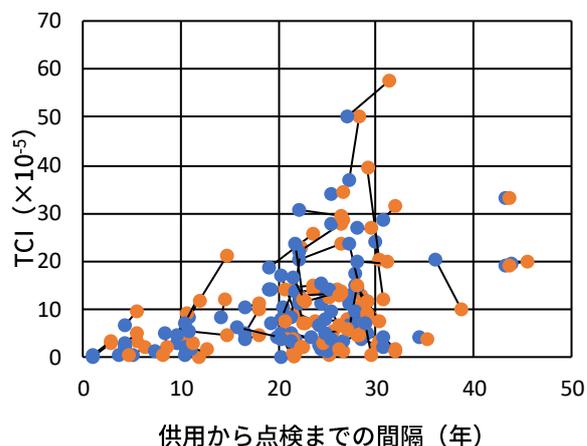


図-8 TCIと各点検までの年数

4. Bシートのみ点数がついているスパンの分析

3章から一部の供用初期のスパンにおいて外力評価点（の傾き）が立ち上がる傾向があることがわかった。そのため、点検A終了から点検Bまでにひびわれが発生していると考えられるスパン、つまり、点検Aでは外力評価点が0点であり、点検Bで外力評価点がついているスパンを全て抽出し3章と同様の分析を行う。

図-9, 10に図-7, 8と同様に供用からの年数と外力評価点, TCIでプロットした。図-9, 10でプロットは横軸に供用から点検Bまでの年数、縦軸に外力評価点, TCIのそれぞれを示したものである。つまり、点検Aから点検Bへの増分を示している。図-9の外力評価点に着目すると供用からの年数が30年以内に点検Bのみに点数がつ

いており、50点程度までの点差が生じており点数が大きく増加しているスパンがあることがわかる。また、僅かではあるが、50点以上の点差がついているスパンも存在することがわかる。図-10でのTCIのみに着目するとTCIの差は外力評価点の点差が50点以上のものも含め概ね 20×10^5 以下でありその中でも多くは 10×10^5 以下までに収まっていることがわかった。さらに、TCIが 60×10^5 以上増加しているスパンも見受けられることや、TCIそのものは 10×10^5 以下に収まっているものの供用直後に外力評価点が増加していると考えられるスパンも存在するため、1回目に行われる点検Bでは、供用初期に評価点が大きく増加する場合に対応するため、全面目視、全面打音を行うことで問題ないと考えられる。2回目以降の点検では1回目の点検Bを基に行われるため、評価点が大きく増加するケースを包括できると考えられる。

5. 覆工コンクリートの健全度を考慮した分析

ここでは、4章で分析したケースについて供用初期に見られる評価点が大きく増加したスパンが点検B実施時にどのような健全度がついているのかを確認するため、図-11に縦軸にTCI、横軸に供用から点検Bまでの年数を取り、点検Bでの健全度に応じてプロットした。この図から、健全度がIとなるスパンは供用年数に関わらずTCIが 5×10^5 以下になることが確認できた。健全度がIIとIII-1以上には明確な境界線は見られないが、概ね、III-1はTCIが 20×10^5 以上であることが読み取れる。境界線が明確に得られない理由としては、ひびわれの量だけではなく、ひびわれのパターンやエフロッセンスなどが影響を与えているためであると考えられる。また、供用から点検Bまでの年数が20年を経過する、または、TCIが 20×10^5 を超えると健全度がIII-1となるスパンが出てくることがわかる。

また、図-9、10を踏まえて図-11を見ると点検Bにのみ点数がついている事例はほとんどがTCIが 20×10^5 以下であることがわかり、その時の健全度はI、IIに該当し損傷程度は軽微であることが確認できた。

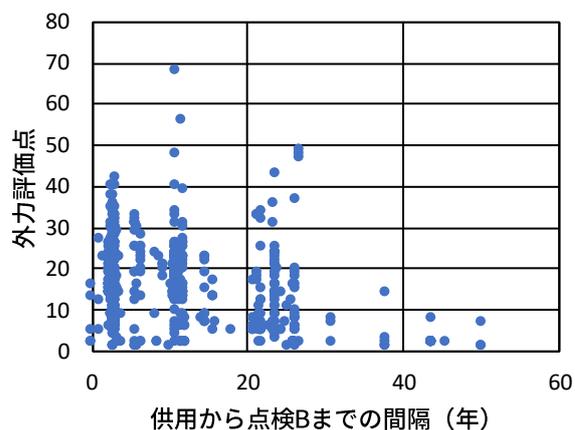


図-9 外力評価点と点検までの年数

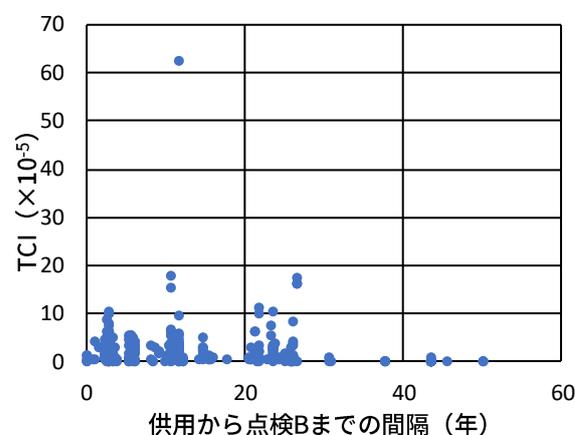


図-10 TCIと点検までの年数

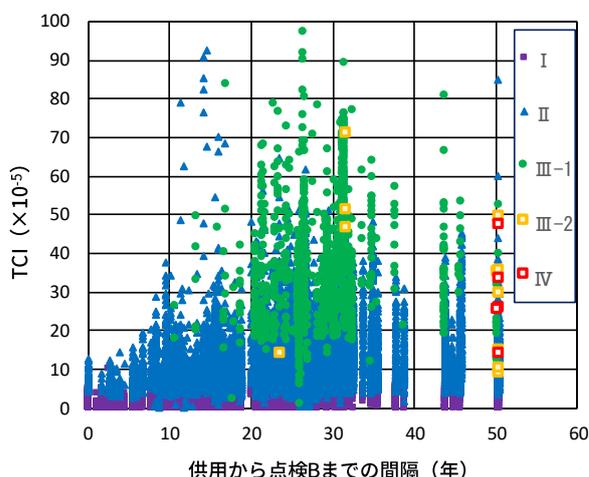


図-11 健全度を考慮したTCIと点検間隔

6. まとめと今後の課題

本論文では高速道路トンネルの点検データを使用して点検Aから点検Bまでの点検日間でこの進行の有無について検討を行ったものである。以下に得られた知見を示す。

- ・供用初期では外力評価点が大きく増加しており、ひびわれが発生したと考えられるが、TCIを取り出すと 20×10^5 程度に留まっていることがわかった。
- ・供用からの年数が20年を経過すると健全度がIII-1となるスパンが出始める。また、その時のTCIは 20×10^5 を超えるケースが多いということがわかった。
- ・供用からの年数とTCI、健全度を用いて分析を行うことで供用初期に外力評価点が大きな増加を見せたスパンの健全度が概ねIまたはIIに分類され比較的軽微な変状の発生が見られるスパンであることが確認できた。また、2回目以降の点検は、1回目の点検Bの結果を基にして2回目の点検Aを行うことから、評価点が大きく増加するケースが生じる可能性がある段階は、包括できることから、1回目の点検Bで全面目視・全面打音を実施することで問題はないと考えられる。

参考文献

- 1) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洗樹, 進士正人: トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.74, No.1, pp.1-14, 2018.
- 2) 土木学会: トンネル・ライブラリー第12号, 山岳トンネル覆工の現状と対策, pp.65, 2002.
- 3) 宮地智仁, 海瀬忍, 林久資, 進士正人: 高速道路トンネルの点検結果の比較検討, 土木学会中国支部第71回研究発表会, VI-8, pp.413-414, 2019.
- 4) 東日本・中日本・西日本高速道路(株): 保全点検要領 構造物編, pp.137-139, 2017.
- 5) 重田佳幸, 飛田敏行, 亀村勝美, 進士正人, 吉武勇, 中川浩二: ひび割れ方向性を考慮した覆工コンクリートの健全度評価法, 土木学会論文集 F, Vol.62 No.4, pp.628-632, 2006.

(2019.8.9 受付)

ESTIMATION OF DEGRADATION FACTORS OF TUNNEL LINING CONCRETE USING HIGHWAY TUNNEL INSPECTION RESULTS

Tomohito MIYAJI, Shinobu KAISE, Hisashi HAYASHI, and Masato SHINJI

Highly accurate and efficient inspection of tunnel lining is strongly demanded due to the increase of aging tunnels in Japan. East Nippon / Central Nippon / West Nippon Expressway Co., Ltd. (NEXCO) implements a combination of vehicle inspection and proximity visual inspection. Therefore, the authors investigated the progress of degradation between two inspections using the inspection data of 43,634 spans of tunnels conducted by NEXCO. An analysis using the tunnel lining crack index (TCI) and the years from in-service to inspection revealed that there was a span in which the evaluation point greatly increased during the initial operation. It was affected by the conversion to the evaluation point using TCI, and it was found that the increase in cracks was slight, and the soundness of the span was generally I or II.