

山岳トンネルの健全度と保有性能の 定量的評価に関する一考察

篠田 将希^{1*}・木村 定雄¹・白子 哲夫²・山田 浩幸³

¹金沢工業大学 環境土木工学科 地域防災環境科学研究所 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

*E-mail: m.shinoda@venus.kanazawa-it.ac.jp

²サンコーコンサルタント(株) 横浜支店 (〒231-0013 横浜市中区住吉町4-45-1)

³(株)鴻池組 本社土木事業本部 企画部 (〒530-8517 大阪市北区梅田3-4-5)

地下構造物の維持管理を進める中で，山岳トンネルを対象に考えると設計時の基準50年以上経過したものが全体の30%を占め，今後，急激に増えることは確実である。

今後，予算の平準化の観点からもアセットマネジメント的な考え方を導入し，計画的な維持管理を行うことが必要となる．一方，山岳トンネルの要求性能が明確でないため，トンネル変状原因の特定や健全度評価，対策工の選定に関しては，担当する技術者の経験に左右される場合がある。

本研究では，変状原因や点検結果が判明しているモデルトンネルの健全度評価を実施するとともに，トータル性能インデックス(TPI)を用いて，点検結果に基づく保有性能の定量的評価を試みた．その結果，点検時の変状の違いや劣化の進行に伴うトンネル全体の総合的な保有性能を評価できる可能性を確認した．

Key Words : mountain tunnel, maintenance, degree of soundness, performance based design
asset management

1. はじめに

21世紀をむかえた現在，高度経済成長期に集中的に建設された構造物がほぼ集中的に老朽化を迎えている¹⁾．地下構造物であるトンネルは他の地上構造物と比べて，供用開始後の補修や補強ならびに改築が困難な構造物である．そこで，トンネル分野においては，トンネルの維持管理コストに対してLCCで最適化するなど，効率的かつ計画的な維持管理体系を整備することが求められている．現在，トンネルの維持管理を効率的に行うために，性能規定に基づくマネジメントの導入が検討され，幾つかの手法が提案されている¹⁾．

性能規定とは，構造物の用途に応じて計画段階，設計段階，施工段階および維持管理段階で要求される性能を明確にし，要求性能とその照査の基本を定める行為である．また，トンネルの維持管理を効率的に行っていくた

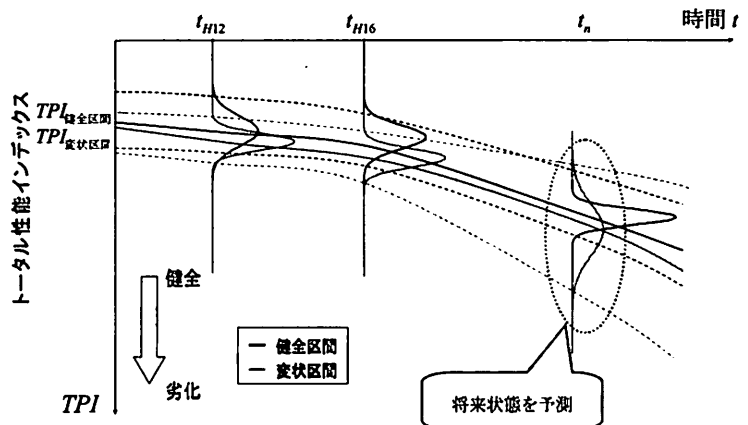


図-1 経時変化によるTPIの劣化イメージ²⁾

めには，トンネルの用途やサービスに応じたサービスアビリティを定め，トンネル全体の総合的な保有性能を定量的に評価し，図-1に示すような将来の保有性能の予測を行うことで適切な維持管理を実行することができると考えられている¹⁾．しかしながら，道路トンネル維持管理便覧³⁾(以下，現行法)の点検評価基準(健全度評価基準)はトンネル覆工のスパンごとに，その変状を確認

し、表-1に示す判定区分を適応して、補修や補強の対策を判断しているが、トンネル全体としての保有性能を評価するものではない。

そこで、性能規定を導入した場合を想定し、*TPI*（トータル性能インデックス）を用いることで、以下に示す道路トンネル（山岳）の維持管理段階を対象とした保有性能評価を行った。

①トンネル全体の総合的な保有性能の定量的評価を実施するために現行の点検評価基準と保有性能評価との整合性を確認した^{4), 5)}。

②経時変化した2時点の道路トンネルの点検評価結果を用いて定量的な保有性能の変化を確認した²⁾。

①に関しては、トンネル内での変状が発生している箇所や、その強度といった不確定な保有性能を確率分布で表現した場合、現行の判定区分に応じた保有性能評価結果のメジアンとボラティリティーを分析して、より定量的に保有性能を評価する必要性があることを確認した。

そこで、道路トンネル維持管理便覧の3A判定（変状の多い区間）とされる点検データとB判定（変状の少ない区間）とされる点検データより*TPI*を用いることで保有性能評価を行った。その結果を図-2に示す。

図-2より、保有性能評価結果を確率分布で表現すると、2つの母集団のメジアンとボラティリティーが違うことがわかる。これより、保有性能評価を行った2つの母集団は違うものであることを確認した。しかしながら、2つの母集団が確実に独立したものであることを検証することはできなかった。

②に関しては、*TPI*を用いてトンネルの保有性能の経時変化を評価できることを確認した。しかしながら、確率分布で表現した場合、図-3に示すように2時点で経時変化していることを確認したが、2つの母集団が確実に独立したものであることを検証することはできなかった。

本研究では、①変状の異なる2つの道路トンネルの点検データを用いて、より定量的に評価するために性能評価基準の配点を6ケースに変化させ、その配点ケース毎に健全区間と変状区間の違いをメジアンとボラティリティーの検定からその違いを明確にすることを試みた^{4), 5)}。

表-1 判定区分の内容³⁾

判定区分	判定の内容
3A	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、直ちになんらかの対策を必要とするもの。
2A	変状があり、それらが進行して、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの。
A	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、重点的に監視をし、計画的に対策を必要とするもの。
B	変状がないか、あっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して影響はないが、監視を必要とするもの。

表-2 重み係数¹⁾

大項目	中項目	小項目	重み係数
A 利用者の安全性能	A1 安全に走行できる	A11 ハンドルをとられない	0.034(0.100)
		A12 コングリートがはく落しない	0.066(0.185)
	A2 利用者の安全を直接脅かさない	A21 漏水が生じない	0.038(0.175)
		A22 風速が生じない	0.066(0.178)
B 利用者の使用性能	B1 乗り心地が良い	B11 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.102)
		B12 風速が生じない	0.034(0.174)
	B2 利用者に不快感・不安感を与えない	B21 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.221)
		B22 風速が生じない	0.017(0.220)
C 構造安定性能	C1 常時作用する荷重に対して安定する	C11 騒音が騒音基準を超過しない(両側コンクリート)	0.022(0.150)
		C12 騒音が騒音基準を超過しない	0.022(0.117)
	C2 必要な耐震性能がある	C21 騒音が騒音基準を超過しない	0.038(0.258)
		C22 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.179)
D 耐久性	D1 防水性が良い	D11 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.179)
		D12 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.263)
	D2 コンクリートの耐久性に影響するはく落を生じない	D21 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.159)
		D22 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.158)
E 管理者の使用性能	E1 常時作用する荷重に対して安定する	E11 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		E12 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
	E2 必要な耐震性能がある	E21 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		E22 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
F 維持管理性能	F1 常時作用する荷重に対して安定する	F11 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		F12 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
	F2 必要な耐震性能がある	F21 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		F22 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
G 周辺への影響度	G1 常時作用する荷重に対して安定する	G11 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		G12 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
	G2 必要な耐震性能がある	G21 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
		G22 騒音が騒音基準を超過しない	0.017(0.157)
合計	1.000	1.000	1.000

表-3 性能評価基準の配点¹⁾

D(配点:1)	C(配点:3)	B(配点:5)	A(配点:7)	AA(配点:15)
性能が低下していない(して)	やや性能が低下している	性能が低下している	著しく性能が低下している	直ちに対策が必要

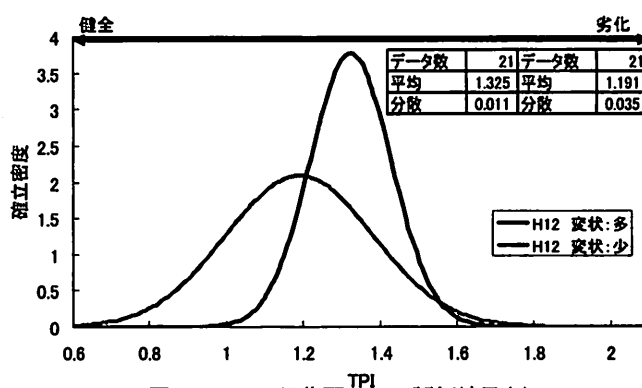


図-2 2つの母集団の*TPI*評価結果(1)

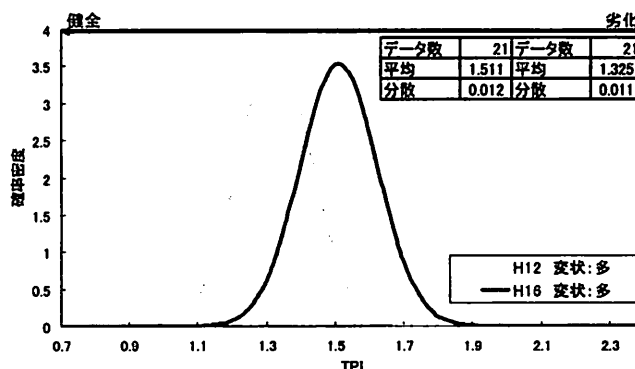


図-3 2つの母集団の*TPI*評価結果(2)

②山岳道路トンネルの経時変化に伴う*TPI*の変化を検討した。すなわち、H16年の*TPI*母集団の分布が、2時点間で変化したか否かを、検定手法を用いて統計的に定量評価することを試みた²⁾。

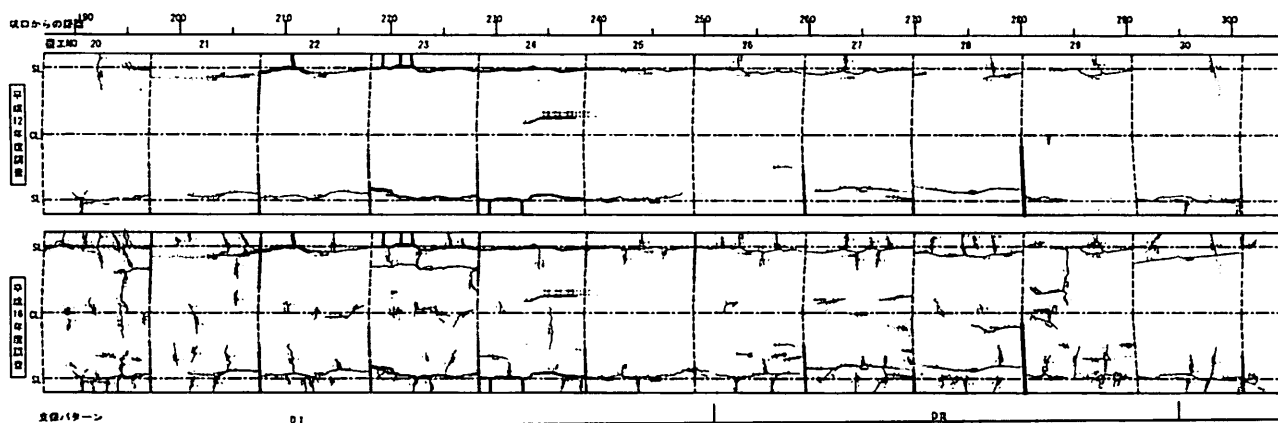


図-4 道路トンネルの覆工展開図（変状の多い11区間）⁶⁾

2. トンネル覆工における保有性能評価

保有性能評価（以下、 TPI ）は、道路トンネルの覆工展開図より評価する。評価では、(1)式を用いて算出する。

$$TPI = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 TPI はトータル性能インデックス、 C_i は重み係数（表-2 参照）である。 TPI は最も健全なもので1点、変状が厳しく劣化した状態では配点を大きくする。 P_i は性能評価基準の配点、重み係数 C_i は高度技術者のアンケートによって定められたものを使用した。図-5 に示すように、この重み係数 C_i と性能評価基準 P_i を乗じたものの総和を TPI とする。

多基準分析（AHP：Analytic Hierarchy Process）とは過去の技術体系と技術者の経験情報を考慮した意思決定モデルによって、保有性能が評価できる手法である。なお、重み係数は1.000 点に近いほど重要度が高くなる。

さらに、表-4 に示した「-」の部分は今回の点検データでは評価を行うことができないものである。しかしながら、総合点を算出し、 TPI に影響を与えないために今回は性能評価基準値 P_i を1点として評価した。

今回、 TPI 評価を行うにあたって評価対象とした道路トンネルの覆工展開図の1例を図-4 および図-6 に示す。

TPI の評価は、H12 年度点検時による道路トンネルの健全区間（変状スパンの少ない区間）とされる21 スパンと変状区間（変状スパンの多い区間）とされる21 スパンを対象として評価を行った。

また経時変化に伴う TPI の変化を確認するにあたり、H12 年度点検時のデータと H16 年度点検時のデータを用いて検定を行い、その結果によって H12 年度から H16 年度の4 年間による経時変化（劣化）の有無を分析した。

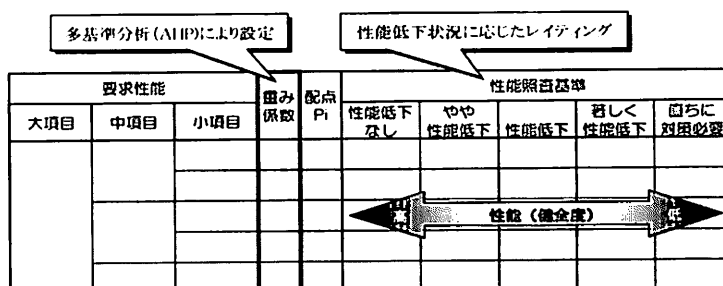
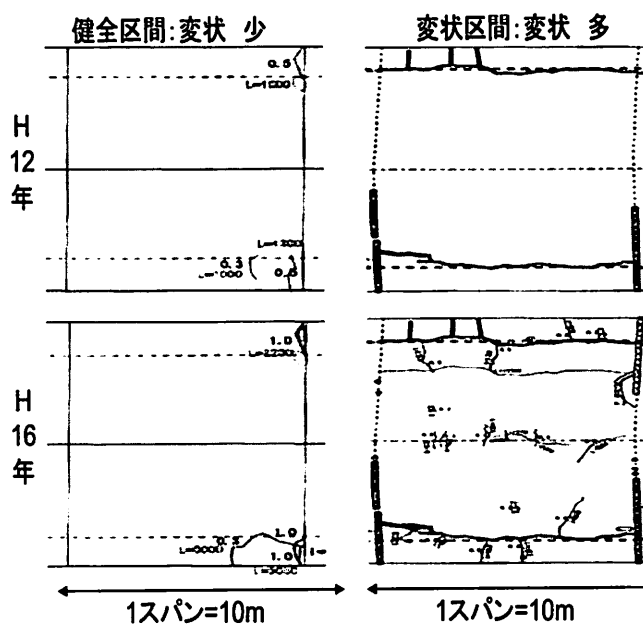


図-5 トータル性能インデックスの算出の考え方¹⁾



表示	目視点検での変状種類	
---	施工目地	うき はく離 (ハンマー打診異常箇所)
~~~~	ひび割れ	はく離 (はく離部)
		溶脱物 (遊離石灰など)・凝結砂
2.0	段差 矢印側突出、段差は段差(m)	漏水 (漏水)
●	漏水 (漏れている部分)	漏水防止工 (漏水工)
○	漏水跡	

図-6 道路トンネルの覆工展開図⁶⁾

表-4 (1) 性能評価基準 (山岳トンネル) ¹⁾

項目	性能評価基準	モニタリング項目 (1)はモニタリング方法	評価項目基準	
			D(記点:1) 性能が低下していない(と判定される)	C(記点:3) やや性能が低下している
1	性能評価方法は今後の研究課題	—	—	—
2	岩盤・鉄筋・土・コンクリート・鋼管・木材の劣化	鉄筋(スケール、水準測量、写真撮影) 鉄筋の位置(水準測量) 鉄筋の埋設位置(スケール、水準測量、写真撮影) 鉄筋の形状(断面測定) 鉄筋の位置(断面測定) 鉄筋の位置(断面測定) 鉄筋の位置(断面測定)	—	—
3	内装工の健全性 内装工の位置 内装工の形状 内装工の位置	内装工の健全性(写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定) 内装工の位置(断面測定)	—	—
4	ひび割れ(位置、長さ、密度) 浮き・はく離	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 長さ・幅(目視、スケール、レーザー、写真撮影、はり出し) 進行性(マーキング、クラックスケール、シーダー、写真撮影) はく離の有無(打撃)	・トンネルアーチ部のひび割れが0.3mm以下の軽微なもの、もしくは認められない ・トンネル側壁部については、0.3mm以上のひび割れが認められても集中しておらず、はく離の恐れがない	・トンネルアーチ部に幅0.3mm以上のひび割れが認められるが、集中しておらず、はく離の恐れがない ・ひび割れの進行性が認められない ・トンネル側壁部については、部分的に0.3mm以上のひび割れ集中箇所が認められ、進行性があるにもかかわらずはく離の危険性は低い(ひび割れ密度は20mm/m ² 以下)
5	材料劣化 (アルカリ骨材、中性化、凍害)	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 強度(ボーリング、反跳硬度法、打撃・打診法、アンカー引抜き法) 中性化深度(中性化試験) 材料(コアボーリング、化学分析、pH試験)	・材料劣化が認められない	・材料劣化が軽やかではあるものの進行している
6	漏水・土砂流出・つらら・困水	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 漏水(写真撮影、サンプリング、流量計測) 漏水・土砂・水質(気圧・温度・湿度、水質検査) 漏水・土砂・水質(気圧・温度・湿度、水質検査) 漏水・土砂・水質(気圧・温度・湿度、水質検査)	・トンネルアーチ部には漏水が認められない ・側壁部から漏水が認められるが、集中の進行性には影響がない	・漏水はあるものの、現在ではほとんど影響がない ・漏水のために将来的に構造物の劣化が促進される可能性がある
7	トンネル内風速・湿度・二酸化炭素濃度	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 風速(風速計) 湿度(湿度計) 二酸化炭素濃度(二酸化炭素計)	—	—
8	異常な振動の発生が確認されている	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 振動(振動計)	—	—
9	性能評価方法は今後の研究課題	—	—	—
10	性能評価方法は今後の研究課題	—	—	—
11	性能評価方法は今後の研究課題	—	—	—
12	ひび割れ・漏水	ひび割れ・漏水(目視・写真撮影)	・停車、もしくは立ち止まっても漏水・ひび割れはほとんど認識できない	・停車、もしくは立ち止まった状態では漏水・ひび割れを認識できるが、進行方向からはほとんど認識できない
13	内装工の健全性 内装工の位置 内装工の形状 内装工の位置	内装工の健全性(写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定) 内装工の位置(断面測定)	—	—
14	性能評価方法は今後の研究課題	—	—	—
15	覆工コンクリートの劣化、移動、沈下	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
16	【土砂の崩壊方向ひび割れ】 ⇒崩壊によるひび割れ ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
17	【アーチ部山側面部の崩壊方向ひび割れ】	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
18	⇒鉛直土圧によるひび割れ ・アーチ部の劣化現象(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
19	【その他ひび割れ】 (16～18以外のひび割れ) ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
20	はく離・はく離による断面欠損	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
21	覆工の内面劣化、覆工厚	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
22	覆工コンクリートの劣化、移動、沈下	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
23	【土砂の崩壊方向ひび割れ】 ⇒崩壊によるひび割れ ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
24	【その他ひび割れ】 (16～18以外のひび割れ) ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
25	はく離・はく離による断面欠損	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
26	覆工の内面劣化、覆工厚	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
27	覆工コンクリートの劣化、移動、沈下	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
28	【土砂の崩壊方向ひび割れ】 ⇒崩壊によるひび割れ ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
29	【その他ひび割れ】 (16～18以外のひび割れ) ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
30	はく離・はく離による断面欠損	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
31	覆工の内面劣化、覆工厚	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
32	覆工コンクリートの劣化、移動、沈下	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
33	【土砂の崩壊方向ひび割れ】 ⇒崩壊によるひび割れ ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
34	【その他ひび割れ】 (16～18以外のひび割れ) ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
35	はく離・はく離による断面欠損	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
36	覆工の内面劣化、覆工厚	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
37	覆工コンクリートの劣化、移動、沈下	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
38	【土砂の崩壊方向ひび割れ】 ⇒崩壊によるひび割れ ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
39	【その他ひび割れ】 (16～18以外のひび割れ) ・覆工の劣化(ひび割れ、圧縮) ・内装工の位置	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—
40	はく離・はく離による断面欠損	位置・範囲(マーキング、写真撮影、打撃・打診法) 内装工の位置(断面測定) 内装工の形状(断面測定)	—	—

表-4 (2) 性能評価基準 (山岳トンネル) ¹⁾

番号	性能評価基準		
	B(配点:5) 性能が低下している	A(配点:7) 著しく性能が低下している	AA(配点:15) 直ちに処置が必要
1	—	—	—
2	—	—	—
3	—	—	—
4	・トンネルアーチ部に部分的に幅0.3mm以上のひび割れ集 中箇所があるが、当面はく落の恐れは無い(ひび割れ密度 は20cm/m ² 以下) ・ひび割れに進行性が認められ、部分的な補修が必要 ・トンネル側壁部全体に幅0.3mm以上の進行性のひび割れ があり、圧さ・浮き認められ、はく落の危険性がある (ひび割れ密度は20cm/m ² ～50cm/m ² )	・トンネルアーチ部全体に幅0.3mm以上の進行性のひび割 れが認められ、将来的にはく落の危険性がある (ひび割れ密度は20cm/m ² ～50cm/m ² ) ・トンネル側壁部の全域に圧さ・浮き認められ、はく落の 危険性がある(ひび割れ密度は50cm/m ² 以上)	・アーチ上部の覆工コンクリート片が、ひび割れの密集や圧 さ、浮きによりはく落の危険性がある (ひび割れ密度は50cm/m ² 以上)
5	・アーチ上部の材料劣化が緩やかに進行している ・側壁部の材料劣化の進行が著しく、将来的にはく落の恐 れがある、または、異状上問題がある	・アーチ上部の材料劣化の進行が著しく、将来車両通行の 障害になる恐れがある、または、異状上問題がある ・側壁部に材料劣化が認められ、覆工コンクリート片がはく 落する危険がある	・アーチ上部に材料劣化が認められ、覆工コンクリート片が 落下する危険がある
6	・漏水のために、将来車両通行の障害になる可能性がある、または凍害 のおそれや異状上問題がある。	・トンネルアーチ部から湧水が湧出して近い将来に通行車両の安全性を 障害する可能性がある	・漏水によりつららや氷害が生じ所定の限界を損なう ・湧水が噴出して通行車両の安全性を損なう恐れがある ・湧水に生ずる土砂流出があり、積雪の崩落、穴下の恐れ
7	—	—	—
8	—	—	—
9	—	—	—
10	—	—	—
11	—	—	—
12	—	—	—
13	—	—	—
14	—	—	—
15	—	—	—
16	—	—	—
17	・変状現象:山間部以外にも軸方向の引張りひび割れがある	・変状現象:圧さまたはせん断ひび割れあり	
18	・変状現象:引張りひび割れ(軸方向、直角方向)が交差して いる	・変状現象:①放射状ひび割れ ②ひび割れによるブロック化 ③圧さまたはせん断ひび割れがある	・アーチ部の変状現象:アーチの変形が顕著(崩落の恐れ)
19	・縦断面方向に中程度のひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5 m以下)、1mm/年以下の進行なし(横断方向は1ランクダウ ン)	・縦断面方向に特に大きなひび割れ(幅5mm以上で長さ10m 以上)、進行なし(横断方向は1ランクダウン) ・縦断面方向の大きなひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m以 上、or幅5mm以上で10m以下)、3mm/年以下の進行(〃) ・縦断面方向に中程度のひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m 以下)、3mm/年～5mm/年の進行なし(〃)	・縦断面方向に特に大きなひび割れ(幅5mm以上で長さ10m 以上)、進行あり(横断方向は1ランクダウン) ・縦断面方向の大きなひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m以 上、or幅5mm以上で10m以下)が10mm/年以上で進行(〃) ・せん断ひび割れや大きな圧さ、進行性あり
20	・構造安定性に影響すると思われる薄いコンクリートのはく 離(うき)、はく落が発見された場合	・側壁部のひび割れの密集・圧さによるうき・はく落が生じコ ンクリートが落下する恐れがある、あるいはすでにはく落が 認められ、構造安定性が低下していると考えられる	・大規模なコンクリートのはく離、はく落がある
21	—	—	—
22	—	—	—
23	—	—	—
24	・変状現象:山間部以外にも軸方向の引張りひび割れがある ・変状現象:引張りひび割れ(軸方向、直角方向)が交差して いる ・縦断面方向に中程度のひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5 m以下)、1mm/年以下の進行なし(横断方向は1ランクダウ ン) ・構造安定性に影響すると思われる薄いコンクリートのはく 離(うき)、はく落が発見された場合	・変状現象:圧さまたはせん断ひび割れあり ・変状現象:①放射状ひび割れ ②ひび割れによるブロック化 ③圧さまたはせん断ひび割れがある ・縦断面方向に特に大きなひび割れ(幅5mm以上で長さ10m 以上)、進行なし(横断方向は1ランクダウン) ・縦断面方向の大きなひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m以 上、or幅5mm以上で10m以下)、3mm/年以下の進行(〃) ・縦断面方向に中程度のひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m 以下)、3mm/年～5mm/年の進行なし(〃) ・側壁部のひび割れの密集・圧さによるうき・はく落が生じコ ンクリートが落下する恐れがある、あるいはすでにはく落が 認められ、構造安定性が低下していると考えられる	・アーチ部の変状現象:アーチの変形が顕著(崩落の恐れ) ・縦断面方向に特に大きなひび割れ(幅5mm以上で長さ10m 以上)、進行あり(横断方向は1ランクダウン) ・縦断面方向の大きなひび割れ(幅3mm～5mmで長さ5m以 上、or幅5mm以上で10m以下)が10mm/年以上で進行(〃) ・せん断ひび割れや大きな圧さ、進行性あり ・大規模なコンクリートのはく離、はく落がある
25	—	—	—
26	—	—	—
27	—	—	—
28	・幅0.3mm以上のクラックが認められ、鉄筋の健全性への影響が懸念 されるが、錆汁や腐蝕がなく現時点では腐食が認められない	・クラックからの錆汁があり、覆工のはく落や耐荷力などの 耐久性低下が懸念される	・鉄筋の腐食腐蝕やコンクリートの浮きを確認され、鉄筋の 性能が低下していたり、覆工がはく落して断面欠損して おり、覆工の耐久性が確保できていない
29	・クラックや打ち継ぎ目から漏水程度の漏水およびエフロエッセ ンスが認められる。覆工の耐久性は維持されているが、耐久性低下が懸 念される ・部分的には覆工表面が湿っている	・防水性能が大幅に損なわれており、湧水量が多く、エフロ エッセンス、鉄筋腐食、凍害などの影響を受けやすくなっ ており、耐久性が著しく低くなっている	・湧水に起因する劣化が生じており、耐久性がなくなっ ている
30	・幅0.3mm以上のクラックが認められ、鉄筋の健全性への影響が懸念 されるが、錆汁や腐蝕がなく現時点では腐食が認められない ・クラックや打ち継ぎ目から漏水程度の漏水およびエフロエッセ ンスが認められる。覆工の耐久性は維持されているが、耐久性低下が懸 念される ・部分的には覆工表面が湿っている	・クラックからの錆汁があり、覆工のはく落や耐荷力などの 耐久性低下が懸念される ・防水性能が大幅に損なわれており、湧水量が多く、エフロ エッセンス、鉄筋腐食、凍害などの影響を受けやすくなっ ており、耐久性が著しく低くなっている	・鉄筋の腐食腐蝕やコンクリートの浮きを確認され、鉄筋の 性能が低下していたり、覆工がはく落して断面欠損して おり、覆工の耐久性が確保できていない ・湧水に起因する劣化が生じており、耐久性がなくなっ ている
31	—	—	—
32	—	—	—
33	—	—	—
34	—	—	—
35	—	—	—
36	—	—	—
37	—	—	—
38	—	—	—
39	—	—	—
40	—	—	—

### 3. トンネル覆工の保有性能の定量的評価

#### (1) 性能評価基準値のパラメータスタディ

トンネル内において変状が発生している箇所や、その強度といった不確定な保有性能を確率密度で表現した場合、現行の判定区分に応じた保有性能のメジアンとボラティリティーを分析して、保有性能の定量的な評価を行う必要があることがわかった。そこで、表-5に示した道路トンネル維持管理便覧の判定区分をベースとして、B判定（健全であるとしている）と3A判定（対策が直ちに必要としている）の判定区分を、より定量的な保有性能として評価する手法を検討する。本文では、道路トンネル維持管理便覧の判定区分による、B判定（健全であるとしている）と3A判定（対策が直ちに必要としている）の判定区分を、より定量的な保有性能として評価するため、性能評価基準の配点をパラメータとした。すなわち、図-7に示すように、性能評価基準による「直ちに対策が必要である」とされるAA判定の配点を3ケース、「適切な時期での対策が望ましい」とされるA判定の配点を3ケース、計6ケースの配点基準変更したものをを用いてTPIを求めるパラメータスタディを実施した。変状区間と健全区間とされる母集団を明確に区分することで、定量的な評価指標の検討を行った。

検定フローを図-8 および図-9 に示す。TPI 評価結果からF検定、t検定、Welch検定^{7), 8)}を行う。ここで、検定において重要となる2つの母集団の有意差を検証するにあたり、有意水準を $\alpha=5\%$ とした。このことから信頼率 $\beta=95\%$ となる。この確率において、0.05以下であれば2つの母集団に有意差があるとされ、0.05以上であれば2つの母集団に有意差が無いとされる^{7), 8)}。これらの検定を、ボラティリティーおよびメジアンの検定によって検証を行う。

D(配点:1) 性能が低下し ていない(して いない)	C(配点:3) やや性能が 低下している	B(配点:5) 性能が低下し ている	A(配点:7) 著しく性能が 低下している	AA(配点:15) 直ちに対策が 必要
--------------------------------------	----------------------------	--------------------------	-----------------------------	---------------------------

ケース	D	C	B	A	AA
①	1	3	5	7	15
②	1	3	5	7	30
③	1	3	5	7	60

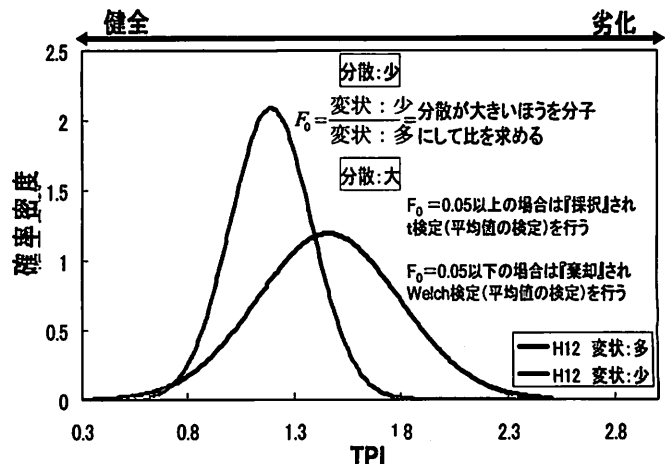
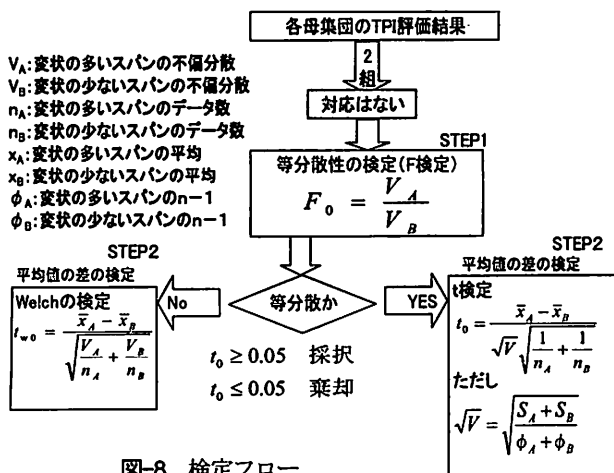
D(配点:1) 性能が低下し ていない(して いない)	C(配点:3) やや性能が 低下している	B(配点:5) 性能が低下し ている	A(配点:7) 著しく性能が 低下している	AA(配点:15) 直ちに対策が 必要
--------------------------------------	----------------------------	--------------------------	-----------------------------	---------------------------

ケース	D	C	B	A	AA
④	1	3	5	20	60
⑤	1	3	5	30	60
⑥	1	3	5	40	60

図-7 配点ケース（計6ケース）

表-5 判定区分の要素³⁾

判定区分	判定の要素				対策の緊急度
	通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	構造物としての安全性に及ぼす影響	維持管理作業量に及ぼす影響	変状の程度	
3A	危険	重大	著しい	重大	直ちに対策を施す。
2A	早晩発かす。異常時に危険となる	早晩重大となる。	大きい	進行中。機能低下も進行する。	早急に対策を施す。
A	将来危険となる。	将来重大となる。	中程度	進行中。機能低下のおそれがある。	重点的に重視をし、計画的に対策を施す。
B	現状では影響がない。	同左	ほとんどない	軽微	監視をする。



#### 4. まとめ

##### (1) 変状区間と健全区間の有意差の検定

各6ケースのTPI評価結果をグラフで表したものを図-10～図-13に示す。また、各ケースにおける検定結果を表-6に示す。表-6をみるとボラティリティーの検定であるSTEP1では、ケース1、ケース2、ケース3のすべてにおいて、健全区間と変状区間の各母集団が“等分散である”ことを確認した。一方、ケース4、ケース5、ケース6では、健全区間と変状区間の各母集団がすべて“等分散でない”という結果を得た。これらは図-10～図-13をみても“等分散でない”ということが概ね見てとれる。STEP2のメジアンを検定では、すべてのケースが棄却された。したがって、健全区間と変状区間の各母集団が“メジアンに有意差がある”ということを確認した。以上の結果より、パラメータスタディを行った6ケースすべてがメジアンを検定で棄却されたことから、健全区間と変状区間の違いを定量的に把握することができる可能性が示された。一方、ケース1、ケース2、ケース3では“等分散である”という結果を得ている。これは、今回用いた道路トンネルのデータでは、「直ちに対策が必要である」とされる変状がないため、パラメータスタディを行っても、TPIに影響しなかったものと考えられる。

##### (2) H12年度とH16年度の経時変化による検定

図-14および図-15に健全区間と変状区間のTPIの母集団の分布を示す。表-8および表-9は健全区間と変状区間によるH12年とH16年のTPIのボラティリティーとメジアンの検定結果を示したものである。健全区間の検定結果を見ると、すべての配点ケースでH12年とH16年のボラティリティーおよびメジアンに有意差があることを確認した。このことから、配点基準の選定にかかわらずTPIのボラティリティーとメジアンの検定によってH12年とH16年で変化する保有性能を表すことが可能である。次に、変状区間の検定結果をみると、すべての配点ケースでH12年とH16年のボラティリティーの結果に有意差が認められた。一方、メジアンに対する検定結果をみると、配点ケース1から配点ケース4ではH12年とH16年の母集団のメジアンに有意差が無く、また、配点ケース5および配点ケース6では有意差があることを確認した。このことから、変状区間の場合配点ケース5および配点ケース6では、H12年とH16年で変化する保有性能を表すことが可能である。今回、健全区間と変状区間に分けて配点基準を適切に定めることによって、保有性能の経時変化をTPIで表すことができることを確認した。

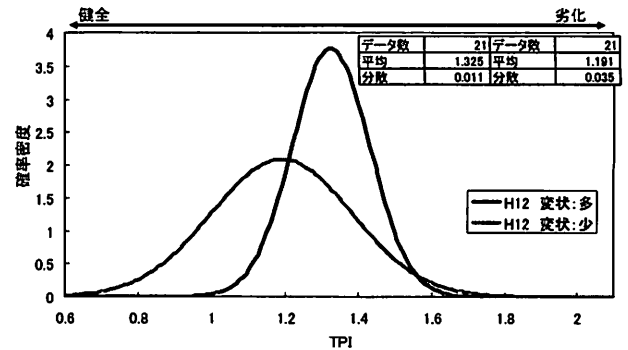


図-10 ケース1～3のTPI評価結果

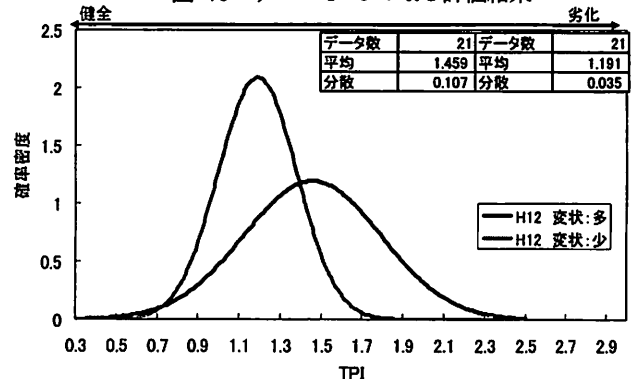


図-11 ケース4のTPI評価結果

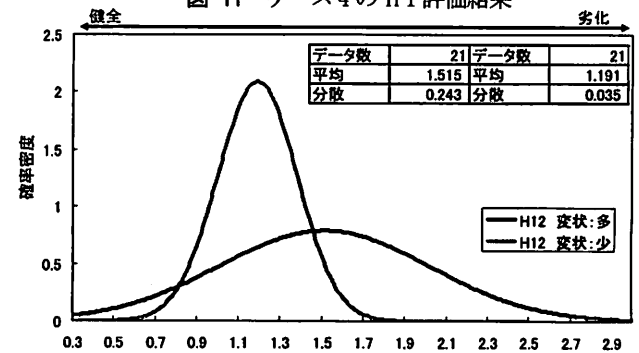


図-12 ケース5のTPI評価結果

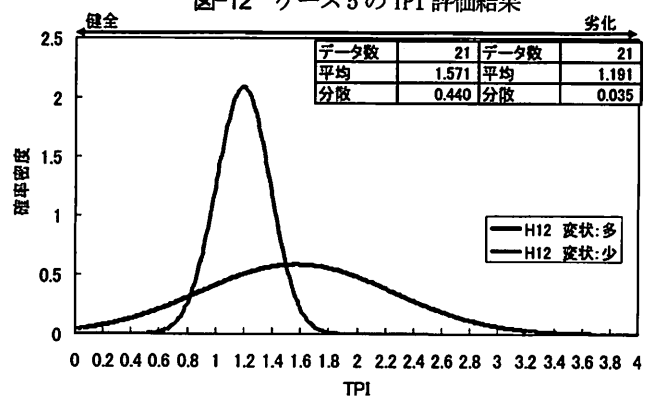


図-13 ケース6のTPI評価結果

表-6 検定結果 (F検定, t検定, Welch検定)

H12年度点検データ 性能評価基準 (配点パターン)					STEP1 F検定 (分散)	STEP2 t検定 (平均)	STEP2 welch検定 (平均)	検定結果
①	3	5	7	15	0.605 > 0.05	1.93E-08 < 0.05		F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					採択	棄却		
②	3	5	7	30	0.605 > 0.05	1.93E-08 < 0.05		F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					採択	棄却		
③	3	5	7	60	0.605 > 0.05	1.93E-08 < 0.05		F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					採択	棄却		
④	3	5	20	60	1.56E-2 < 0.05		3.19E-03 < 0.05	F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					棄却		棄却	
⑤	3	5	30	60	5.81E-05 < 0.05		1.07E-02 < 0.05	F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					棄却		棄却	
⑥	3	5	40	60	4.39E-07 < 0.05		2.13E-02 < 0.05	F検定: 多=F検定: 少 t検定: 多=t検定: 少
					棄却		棄却	

すなわち、今回分析した点検データは維持管理便覧³⁾らの判定基準によって AA 判定となるスパンはなく、A 判定となる変状に相当する変状区間のデータが主な判定に位置づけられていたため、性能評価の配点基準を 30 点以上のパラメータとして設定したケース 4、ケース 5、ケース 6 において、有意差がでたものと考えられる。

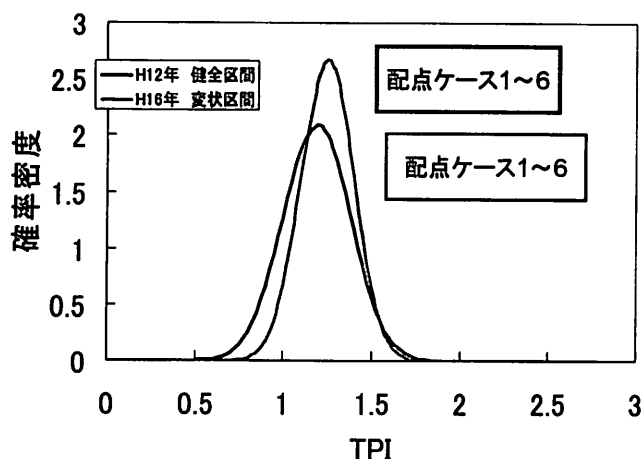


図-14 TPI の母集団の分布 (健全区間と変状区間)²⁾

表-7 2 点間の母集団のデータ²⁾

TPI	1, 3, 5, 7, 15	平均値	標準偏差	分散
健全区間	H12年	1.191	0.191	0.035
	H16年	1.249	0.149	0.021
変状区間	H12年	1.325	0.106	0.011
	H16年	1.511	0.113	0.012

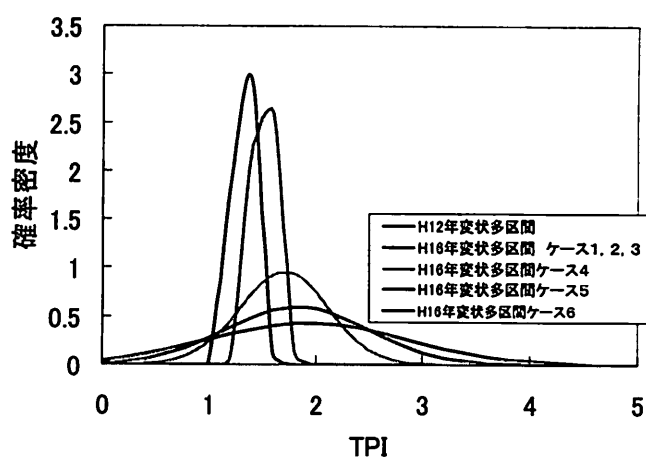


図-15 TPI の母集団の分布 (変状区間)²⁾

表-8 検定結果一覧表(変状区間：変状の少ない区間)²⁾

ケース	性能評価基準値 パラメータスタディ		TPIの母集団結果		F検定 (ポラティリティの検定)	Welch検定 (マジアン検定)
			平成12年	平成16年	0.05<F 等分散である×	0.05<T, マジアン に有意差がある○
1	1, 3, 5, 7, 15	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○
2	1, 3, 5, 7, 30	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○
3	1, 3, 5, 7, 60	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○
4	1, 3, 5, 20, 60	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○
5	1, 3, 5, 30, 60	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○
6	1, 3, 5, 40, 60	マジアン	1.191	1.249	0.275	0.278
		ポラティリティ	0.035	0.021	X	○

有意差あり○, 有意差なし×

表-9 検定結果一覧表(変状区間：変状の多い区間)²⁾

ケース	性能評価基準値 パラメータスタディ		TPIの母集団結果		F検定 (ポラティリティの検定)	Welch検定 (マジアン検定)
			平成12年	平成16年	0.05<F 等分散である×	0.05<T, マジアン に有意差がある○
1	1, 3, 5, 7, 15	マジアン	1.325	1.511	0.773	0.000
		ポラティリティ	0.011	0.012	X	X
2	1, 3, 5, 7, 30	マジアン	1.325	1.511	0.773	0.000
		ポラティリティ	0.011	0.012	X	X
3	1, 3, 5, 7, 60	マジアン	1.325	1.511	0.773	0.000
		ポラティリティ	0.011	0.012	X	X
4	1, 3, 5, 20, 60	マジアン	1.459	1.705	0.334	0.042
		ポラティリティ	0.112	0.174	X	X
5	1, 3, 5, 30, 60	マジアン	1.515	1.824	0.222	0.099
		ポラティリティ	0.256	0.446	X	○
6	1, 3, 5, 40, 60	マジアン	1.571	1.943	0.186	0.145
		ポラティリティ	0.462	0.845	X	○

有意差あり○, 有意差なし×

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第21号，性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント，2009.10.
- 2) 横山正浩，木村定雄，長沼諭：検定手法を用いた既存山岳道路トンネル覆工の保有性能の定量的評価(2)，土木学会第65回年次学術講演会，CS部門，2010.9.
- 3) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，2005.11.
- 4) 篠田将希，木村定雄：点検データを用いた既存山岳路トンネルの保有性能の評価，中部支部研究発表会，VI 部門，2010.3
- 5) 篠田将希，木村定雄，山田浩幸：検定手法を用いた既存山岳道路トンネル覆工の保有性能の定量的評価(1)，土木学会第 65

回年次学術講演会，CS 部門，2010.9.

- 6) 山田浩幸，駒村一弥，山本雅広，田中康弘：山岳トンネルによる健全度評価と劣化予測に関する一考察，地下空間シンポジウム，pp.1-10,2007.1.
- 7) 木谷理志，清水幸範，木村定雄：トンネル覆工の長期構造性能評価・予測に関する研究(1)－初期の力学性能の確率論的評価に関する一考察－，土木学会第 59 回年次学術講演会，VI 部門，2004.9.
- 8) 奥村士郎：統計的手法入門テキスト－検定・推定と相関・回帰及び実験的计划－，2008.11.