

覆工表面ひび割れ分布と振動特性に着目した トンネル健全度評価手法の検討

谷口徹也¹・米田裕樹²・草場雅哉³・蔣 宇静⁴

¹正会員 西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴1-2-22)
E-mail: t.taniguchi.a@w-e-kyushu.co.jp

²正会員 協同エンジニアリング株式会社 (〒870-0876 大分県大分市三芳1238-1)
E-mail: yoneda@kyodo-cec.co.jp

³学生会員 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: bb52117503@ms.nagasaki-u.ac.jp

⁴フェロー 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)
E-mail: jiang@nagasaki-u.ac.jp

本報告は、大分県内の老朽化した実トンネルを対象に、覆工の表面ひび割れ分布や常時微動計測に基づく振動特性について考察を行い、表面ひび割れと覆工背面空洞との相関を詳細に分析した。特に覆工背面空洞が大きいほど、振動フーリエスペクトルの値が大きくなり、覆工の不健全部と健全部の相違が明示できた。さらに、覆工背面空洞の存在がトンネル天端部の緩み領域を拡大させ、崩落を防止する対策工が必要であることを地山劣化モデルを用いた数値解析により示した。

Key Words : crack density, tunnel lining, voids, vibration properties, numeric analysis

1. はじめに

高度成長期に建設された多くのトンネルが数十年を経過し、覆工コンクリートの劣化進行に伴って健全度の的確な診断と対策が余儀なくされている。現在の点検手法は、点検者の近接目視、打音、触診により判定がなされ、定量的評価が十分でないのが現状である。覆工コンクリートの劣化・損傷の原因は、経年的な老朽化以外に地山の地質変化などの影響も受け、変状原因が複雑であることから、地山状況の変化に対するアプローチも必要である。本報告では、覆工コンクリートの常時微動の計測と覆工表面のひび割れ、覆工背面空洞の調査結果に基

づき、覆工の剛性の評価手法について検証した。また、覆工背面空洞の存在が緩み領域を拡大させて補強対策工が必要になることについて、緩み荷重作用を受ける覆工と地山との相互作用を考慮した地山劣化モデル¹⁾を用いて有限差分法数値解析で示した。

2. 研究対象トンネルの地質と変状概要

研究対象トンネルは、昭和29年に施工された幅員4.1m、高さ4.9mの在来工法で施工されたトンネルである。図-1に研究対象トンネル平面図を、図-2に地質縦断面図(イメージ図)を示す。トンネル周辺の地質は、主に万年山火山等の活動に関わる火山扇状地堆積物によって構成する

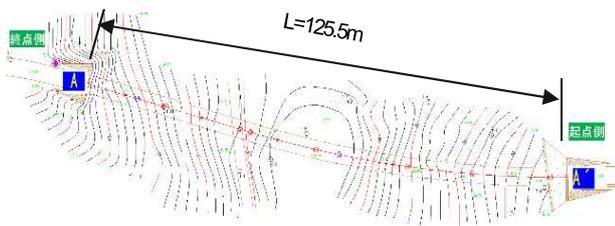


図-1 研究対象トンネル平面図

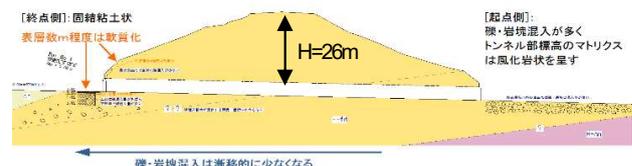


図-2 トンネル地質縦断面図(イメージ図)

と推定され、この基盤に万年山火山の安山岩質溶岩が分布している。トンネル延長は125.5m、最大土被りは26m、周辺地山の一軸圧縮強度は0.51N/mm²、静弾性係数は220～420MN/m²と推定されている。地山の自立性は悪く、地山強度比が1.6程度であることから、地山等級DII程度と推測される。このような状況から、本トンネルは通行に支障が出るほど覆工コンクリートの劣化損傷が進んでおり、定期点検による対策区分は、IVと判定されている²⁾。図-3にトンネル断面図、図-4(a)に覆工表面のひび割れ分布図、図-4(b)に空洞探査測定位置図、図-4(c)に背面空洞調査結果を示す。図-4から次のとおり整理できる。

- ① スパン 15, 16 のアーチ部に幅 3.0mm 以上の縦断方向のひび割れがあり、スパン 17 で幅 2.0mm 以上の斜め横断、縦断するひび割れが確認された。
- ② スパン1から4, 13～17ではひび割れが密集しており、幅0.3mm以上のひび割れ密度が0.2m²/m²を超える。
- ③ ひび割れの対策区分は、スパン15, 16がIV判定で、スパン17はIII判定である。
- ④ うき・はく離の対策区分は、スパン9, 10, 12, 16がIV判定であり、それ以外はIII判定である。また、全面的に浮きが分布している。
- ⑤ 覆工背面空洞箇所はトンネル中心線左肩部よりも中心部および右肩部のほうが大きい。

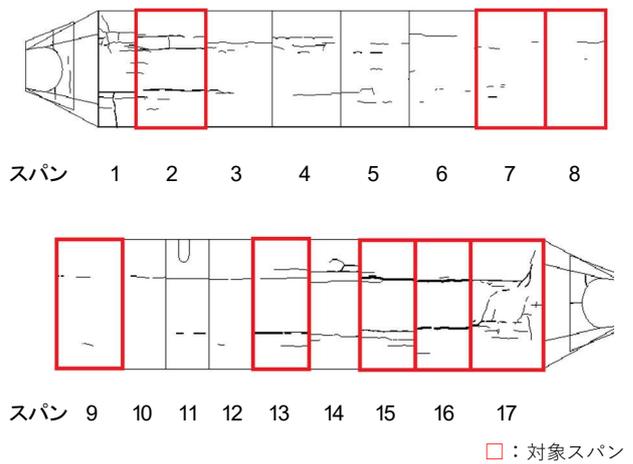
3. 覆工表面ひび割れ分布の定量的評価

(1) ひび割れ密度とTCIIによる評価

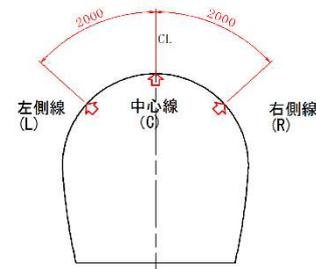
覆工背面空洞と覆工表面ひび割れが多い箇所および少ない箇所を8スパン選別し、対策区分に対するひび割れ密度とTCI指数算出結果を比較した。その結果、スパン17のひび割れ密度は0.56m²/m²に対して対策区分はIII判定(ひび割れ幅2mm, 延長2.5m)である³⁾。この一方で、スパン15, 16はひび割れ密度は0.47m²/m²および0.27m²/m²と、スパン17に比べて小さいが対策区分はIV判定(ひび割れ幅3mm, 延長5m以上)と悪い判定となっている。



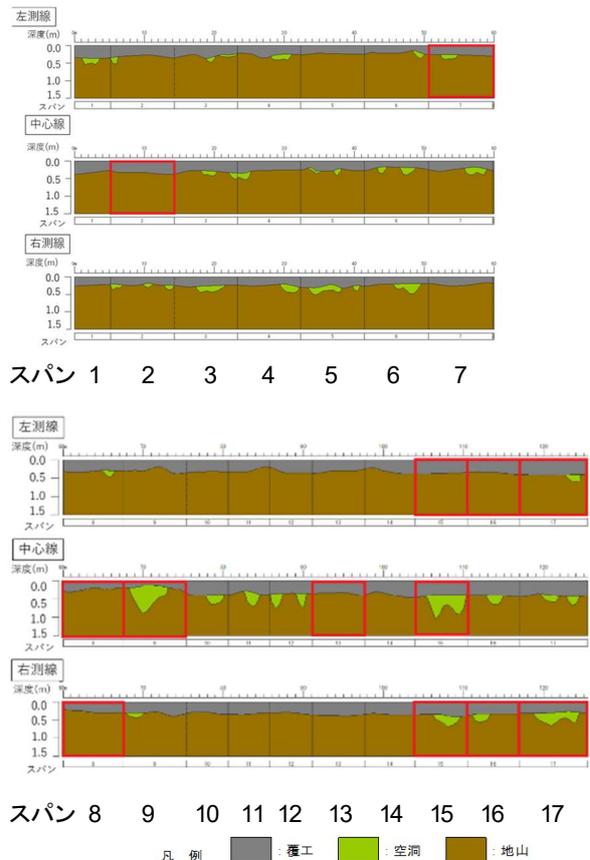
図-3 トンネル断面図及び終点側坑口部写真



(a) 覆工表面ひび割れ分布



(b) 覆工空洞調査位置断面図



(c) 覆工背面空洞分布図

図-4 対象トンネルの覆工表面ひび割れ分布と覆工背面空洞分布

これは図-5に示すとおり、ひび割れ密度の大きさに比べてひび割れ幅と方向が考慮された TCI 指数のほうが、対策区分の判定に近い状況を示していることがわかる。

(2) フラクタル次元による評価

全スパンの覆工表面ひび割れの分布状況について、フラクタル次元解析を行った。一般には、ひび割れ分布が多いほどフラクタル次元は大きくなる傾向にある⁹⁾。フラクタル次元解析の手法は、様々な図形に対して適用できる汎用性と、コンピュータを利用した解析方法として一般的な Box Counting 法を採用した。本手法は、ひび割れ展開図を幅 r の格子状に分割し、その格子中に少なくとも 1 本のひび割れが含まれるような正方形の数を計上するものである。フラクタル次元算出式を式(1)に示す。

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log \left(\frac{1}{r}\right)} \quad (1)$$

ここに、 D : フラクタル次元
 $N(r)$: 正方形の数
 r : 分割幅

表-1にスパンごとおよびスパンを左右に分けた場合のフラクタル次元、背面空洞調査結果およびひび割れ密度を示す。

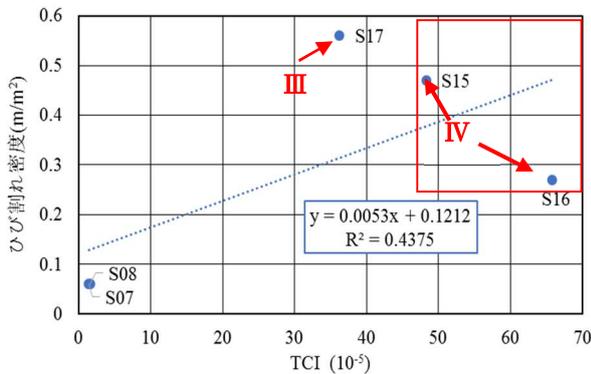


図-5 ひび割れ密度とTCI指数に対する対策区分判定結果³⁾

表-1 推定天端空洞厚とひび割れ密度とフラクタル次元
 (フラクタル次元左: スパン全体右: スパン左右)

スパンNo.	推定覆工厚 (cm)	フラクタル次元 (スパン全体)	フラクタル次元 (左)	フラクタル次元 (右)	推定天端空洞厚 (cm)	ひび割れ密度 (m/m ²)
1	21.3	1.435	1.3299	1.5334	0	0.58
2	22.2	1.302	1.3431	1.4655	0	0.45
3	23.1	1.221	1.2076	1.2465	26.7	0.25
4	20.9	1.355	1.3308	1.4803	21.8	0.38
5	18.1	1.11	1.0925	1.1	20.8	0.18
6	13.3	1.058	1.3709	1.1169	19.6	0.12
7	16.3	1.094	1.1608	1.0052	17	0.08
8	18.4	1.095	1.3338	1	0	0.06
9	12	1.145	1.2492	1.2193	78	0.03
10	28.6	1.32	1.3167	1	38.7	0.14
11	18.4	1.38	1.2955	1.437	30.7	0.18
12	20.2	1.393	1.2293	1.111	35.5	0.19
13	25.5	1.43	1.4757	1.4961	0	0.33
14	20.4	1.471	1.522	1.4372	0	0.43
15	33.5	1.491	1.5017	1.5175	88.4	0.47
16	32.3	1.413	1.5272	1.6371	25.8	0.27
17	26.5	1.393	1.3816	1.4166	30.3	0.58

注1) フラクタル次元 ■ は左右両方1.5以上のスパンを示す
 注2) 天端空洞厚 ■ は30cm以上のスパンを示す
 注3) ひび割れ密度 ■ は0.2m/m²以上のスパンを示す

4. 常時微動計測の実施

本研究では、トンネルの健全度を判定する手法として、トンネルの振動特性を用いることにし⁴⁾⁶⁾⁷⁾、対象スパンの常時微動計測を行った。常時微動とは、地盤中を伝播する人工的または自然現象による種々の振動のうち、特定の振動源から直接的に影響を受けない状態で、さまざまな振動によって励起される微小な地盤振動である。常時微動計測は、微小な地盤振動を計測して地盤の振動特性の推定や地盤種別の判定などに適用されている⁴⁾。

ここでは、覆工面において微小な振動を計測するために、分解能1mgalという微小加速度を計測できるサーボ型加速度計を用いた。加速度計の取り付け位置は、図-6に示すとおり天端部、左肩部、右肩部において、トンネル軸方向、横断方向、上下方向の3方向に取り付けた。写真-1に加速度計取り付け状況を示す。

得られた加速度波形の一例を図-7に示す。また、算出

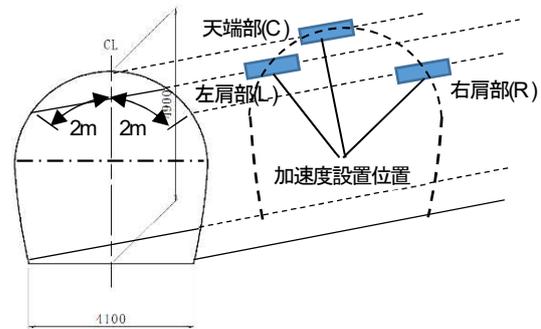


図-6 加速度計の取り付け位置



写真-1 加速度計取り付け状況

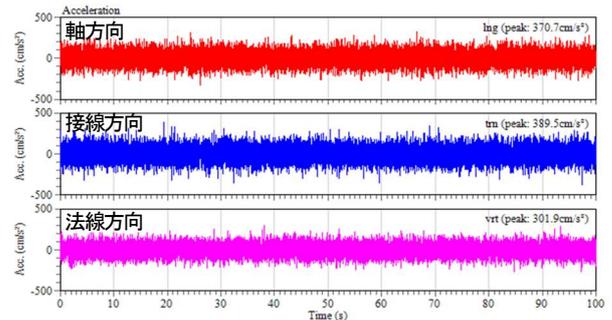


図-7 加速度波形の一例

した各スパンのフーリエスペクトル代表値を表-2に示す。表中のスパンNo.は、Lが左肩部、Rが右肩部、Cが天端部の計測位置を示す。フーリエスペクトル解析は、0.001秒間隔で180秒間計測した加速度からスパイクノイズを取り除き、6個の10秒間の加速度データを作成して行った。解析は、建築研究所のソフトウェアの「View Wave」を使用してフーリエスペクトルを求めた。1個あたりのフーリエスペクトルの代表値は、加速度計の計測周波数範囲のうち信頼性がある範囲である15Hzから250Hzまでの平均値とし、1スパンあたりの代表値は、6個のフーリエスペクトルの最小値を式(2)により3方向を合成したフーリエスペクトルを代表値とした。

$$\text{フーリエスペクトル代表値} = \sqrt{AF^2 + TF^2 + NF^2} \quad (2)$$

ここに、AF：軸方向フーリエスペクトル
 TF：接線方向フーリエスペクトル
 NF：法線方向フーリエスペクトル

5. 覆工表面ひび割れ分布と振動特性の関係

比較的覆工背面空洞が少なくその影響を受けにくいと推測される、左右のフーリエスペクトルとフラクタル次元の関係を図-8に示す。プロットされた点は、おおむねひび割れに対する対策判定区分³⁾の比較的健全な予防保全段階の判定IIb、早期措置段階の判定III、緊急措置段階の判定IVの範囲に区分できることが分かった。判定IIbの範囲のフーリエスペクトルおよびフラクタル次元は小さい値を示し、判定IIIおよび判定IVの範囲は大きい値を示している。また、図-5に示す判定IVのスパン15、16のTCI指数が高いという結果と、同スパンのフーリエスペクトルとフラクタル次元が高いという結果から、高速道路会社の健全度評価に使用されているTCI指数と同様の傾向を示したことが分かった。

表-2 フーリエスペクトル代表値

スパンNo.	フーリエスペクトル (mgal*sec)	スパンNo.	フーリエスペクトル (mgal*sec)
7L	44.777	2C	48.518
8R	45.549	7L	42.564
15L	44.6	8C	49.386
15R	45.502	8R	43.866
16L	45.05	9C	60.39
16R	45.711	13C	46.491
17L	44.903	15C	49.267
17R	45.71	-	-

L：左肩部 C：天端部 R：右肩部

6. 振動特性と覆工背面空洞との相関

対象スパンのフーリエスペクトルと、電磁波探査に基づいて算出した覆工背面空洞の体積との関係を図-9に示す。覆工背面空洞の体積が大きいスパンの天端部フーリエスペクトル9C、15Cに着目する。9Cは、フラクタル次元が1.145と他のスパンよりひび割れは少ないが、フーリエスペクトルは60.390mgal*secと高い値を示す。15Cは、フラクタル次元が1.491とひび割れが多いが、フーリエスペクトルは49.267mgal*secと9Cより低い値となった。これは、覆工背面空洞の体積がスパン9のほうが大きいことから、フーリエスペクトルは覆工背面空洞の体積に影響を受けるのではないかと考えられる。

天端部に覆工背面空洞が存在しないスパンの天端部フーリエスペクトル13C、2C、8Cに着目する。覆工背面空洞が存在しなければ、フラクタル次元が増加するとフーリエスペクトルも増加すると想定していた。しかし表-1に示すとおり、フーリエスペクトルの増加に対してフラクタル次元はスパン13で1.430、スパン2で1.302、スパン8で1.095と減少している。そこで、推定覆工厚に着目すると、スパン13で25.5cm、スパン2で22.2cm、スパン8で18.4cmと薄くなっていることから、覆工厚が薄くなるとフーリエスペクトルは増加傾向になるのではないかと推測した。

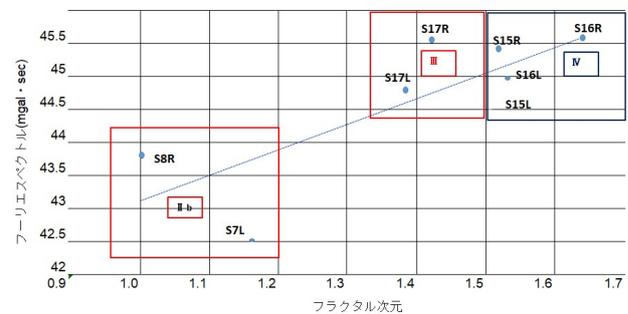


図-8 フーリエスペクトルとフラクタル次元との関係

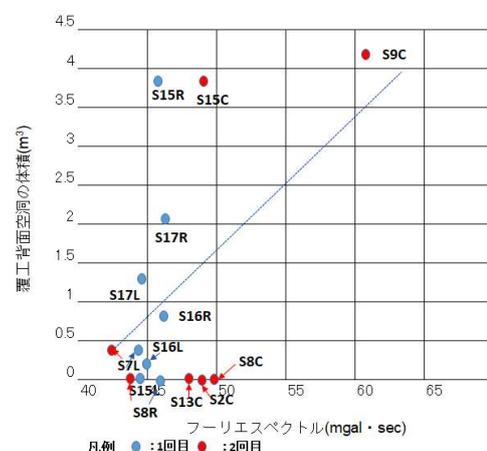


図-9 フーリエスペクトルと覆工背面空洞体積との関係

覆工背面空洞が存在するスパン15, 16, 17に着目する。図-10に各計測位置でのフリーエスペクトル、図-11に覆工背面空洞調査結果図を示す。同スパンの左肩部、天端部、右肩部に着目すると、覆工背面空洞の有無とフリーエスペクトルの値には相対的に関連があるように見える。しかし、各スパン同士のフリーエスペクトル値と覆工背面空洞量には関連性を見出すことは困難であることから、フリーエスペクトルの値は、ひび割れ分布の程度、覆工厚、覆工背面空洞などによる複合的な要因により変化するものと考えられる。

トンネル変状を顕在化させる原因は、図-12⁸⁾に示すように、①未固結地山のトンネル周辺地山強度低下、②緩み領域の拡大助長（覆工背面空洞等の残存、ブロッキングポイント応力集中等）、③覆工の耐荷力不足（施工不良・巻厚不足・覆工材料品質不良）、④緩み圧（荷重）の増加（地震・近接施工による鉛直地圧の増減等）が複合的に関連していると考えられるが、ひび割れ分布が少なく覆工背面空洞が存在しないが、フリーエスペクトルの

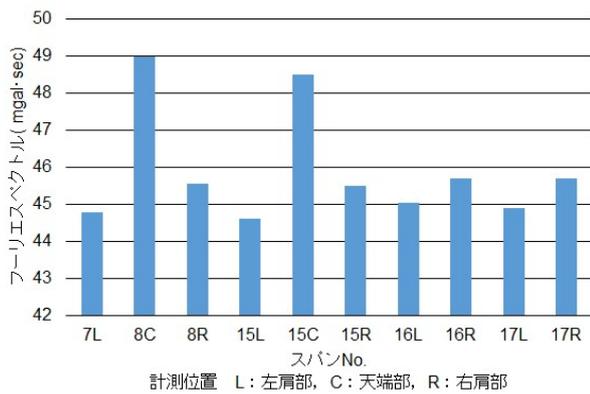


図-10 各計測位置のフリーエスペクトル

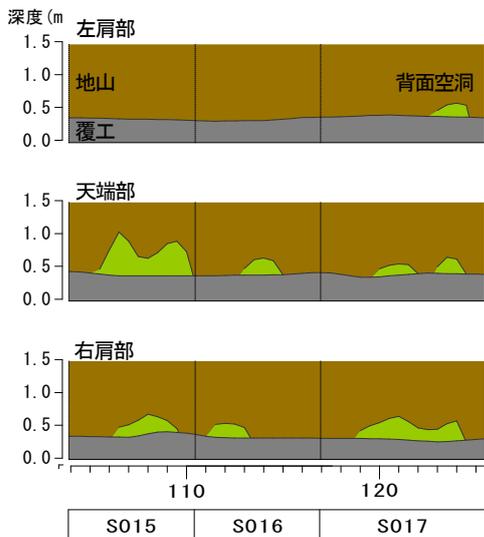
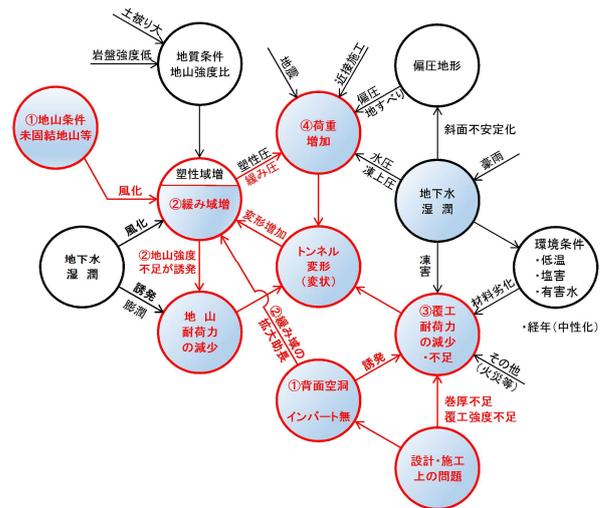


図-11 覆工背面空洞調査図(スパン15, 16, 17)

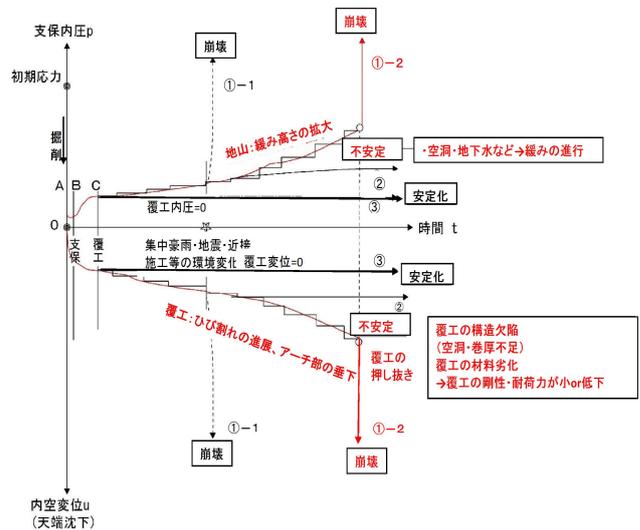
値が比較的高いスパン8の変状は、内因としては覆工耐荷力の減少や不足、外因としては地山耐荷力の減少が推測されるが、これらを分析の要素として加えていくことが今後の課題である。

一方、ひび割れ分布が少なく覆工背面空洞の体積が大きく、フリーエスペクトルの値が高いスパン9については、天端部の覆工厚が12cmであることから、図-13に示す緩み圧の変状メカニズム⁸⁾に示されるように、最終的には押し抜きせん断で覆工が突発崩壊を起こす可能性を秘めていると推察できる。



○ : 今回関係する変状メカニズム

図-12 トンネルの変状関連図⁸⁾より引用 (加筆修正)



	緩み圧の進行	支保内圧	内空変位 (天端沈下)	トンネルの状態	備考
曲線①	大	大	大	不安定	覆工の耐荷力以上の荷重が外力として作用した場合には覆工が押し抜き破壊で崩壊に至る場合がある。
曲線②	小~中	小~中	小~中	↑ 安定	
曲線③	0	0	0		

図-13 緩み圧によるトンネル変状の進行状況

トンネルの変状関連図⁸⁾より引用 (加筆修正)

NATMで施工されたトンネルは、地山変位が収束した後に覆工が施工されるため、覆工に外力は作用しないのが一般的である。このため、トンネル上部領域あるいは周辺の地山状態等に変化が無ければ、曲線③で示されるように、覆工に変位は生じず変状として現れることはない。一方、矢板工法で施工されたトンネルは、覆工と地山との密着性が低く、覆工打設後においても地山の緩みが生じることから、最終的には覆工も荷重を受け持つという構造となっている。このため曲線②に示されるように覆工打設後、時間の経緯と共に地山の緩み高さが拡大し覆工に緩み荷重が外力として作用し、ある段階で安定することになる。スパン9はさらに、地下水流入などによる周辺地山の風化が進むと、トンネル上方の地山の緩み高さが時間と共に拡大し、曲線①-2で示されるようにトンネル上部の緩んだ地山が荷重として覆工に作用し、緩み領域の拡大とともに支保内圧が徐々に増加する。それに伴いトンネルの内空変位も増加し、覆工にひび割れが発生、進展することになり、緩み荷重が覆工の耐荷力以上となった時点で覆工が押し抜き破壊され、崩壊に至る場合があるというメカニズムが想定される。

7. 数値解析による検討

(1) 解析モデルの概要と変状解析手順¹⁰⁾

変状したトンネルの覆工に作用する外力や、その結果として生ずる覆工応力を正確に把握することは困難な場合が多い。近年では、変状トンネルに関する実績分析や模型実験、数値解析などの研究が進められ、数値解析によって定量的に変状予測が行われる事例が増えてきた。その中で、梁、ばねモデルによるひび割れ進展解析⁹⁾は、実現場変状トンネルの段階的対策工をシュミレートでき、対策工の効果を評価はできるが、問題点は、圧縮損傷以降の変形挙動や地山クリープの効果を考慮できないため、変位が実測値より解析値のほうが小さく、変状対策の主目的のひとつである変位速度の抑制効果を表現できない。そのため、変位を時間で評価できる新たな時間概念の解析手法の開発が望まれる。

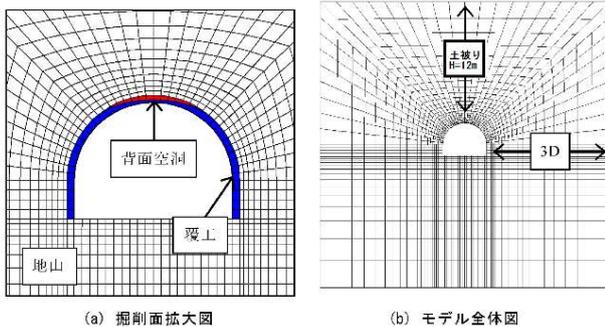


図-14 解析モデル

ここでは、地山劣化モデルによる変状予測手法⁷⁾を用いることにする。特徴としては覆工の発生応力や変形量とともに、周辺地山の応力状態や劣化状況（塑性領域）などが評価され、覆工の力学的挙動だけでなく周辺地山の応力状態についても取り扱うことができる。

解析モデルでは、図-14に示すとおり突発性崩壊に着目し健全度判定区分IIIと判断される天端覆工厚 20cm 以下、空洞厚 30cm 以上を想定した。

解析に用いたパラメータを表-3に示す。覆工の劣化は、既往研究を参考にして覆工の剛性を表-3のように低下させて表現した。解析ケースとして、覆工の強度低下を変化させたケースを設定した。

(2) 数値解析結果

図-15に周辺地山の鉛直変位を、図-16は覆工強度低下による差異を示す。図-15ではトンネルの背面空洞の存在によって緩み領域が拡大していることがわかる。特に、背面空洞部における覆工の鉛直変位が大きく生じており、天端部が崩落する恐れがあることから覆工の内面補強など対策が必要であると考えられる。

表-3 解析パラメータの設定

	項目	値
地山	変形計数E	417 MN/m ²
	ポアソン比ν	0.35
	一軸圧縮強度σ _c	0.37~0.57 N/mm ²
	内部摩擦核φ	17°
	密度	1.631 g/cm ³
トンネル(覆工)	変形計数E	22 GPa
	ポアソン比ν	0.2
	粘着力c	6.0 MPa
	内部摩擦角φ	35°
	密度	2.3 g/cm ³
	引張力	1.0 MPa

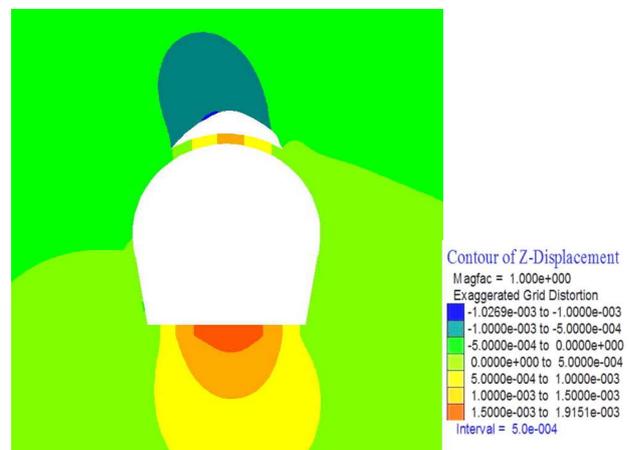


図-15 周辺地山の鉛直変位

図-16 は背面空洞が覆工の健全度に与える影響を解析した結果である。図-16(a)が健全な覆工、図-16(b)(c)(d)が覆工の強度を 20%、30%、40%に低減させた際の覆工応力を示している。この結果、覆工の強度の低下に伴い覆工のアーチ部に引張応力が増加した。実現場の調査でもアーチ部に多くのひび割れが生じていることから、実際の現場の状況を表現できていると考えられる。

8. おわりに

本報告では、大分県内の老朽化トンネルを対象に覆工表面ひび割れと振動特性との関連性、振動特性と覆工背面空洞との関連性についてそれぞれ検証した。その結果、振動特性と覆工背面空洞には関連性があるが、振動特性は、覆工背面空洞の大きさだけでなく、覆工厚による影響など複合的に考慮する必要があることが明らかとなった。また、振動特性とひび割れ分布および覆工背面空洞との関連性から、トンネルの変状メカニズムと照合して地下水流入などによる周辺地山の風化が進むと、緩み領域が拡大して押し抜きせん断で覆工の崩壊に至る恐

れがあることを説明することができた。

さらに、覆工と地山強度低下を考慮した数値解析により、覆工の強度低下が進むと早期に緩み領域が進展し、覆工の崩壊につながる可能性が大きくなることが明らかになった。これにより、覆工背面空洞注工によるゆるみ領域の抑制に加え、覆工自体の補強の必要性も指摘することができた。

今後は、様々な覆工及びその周辺の条件での数値解析と、常時微動計測結果の分析の実績を積み上げ、常時微動計測によってひび割れ分布や覆工厚、覆工背面空洞など複合的要因によるトンネル構造の剛性を評価する手法の確立を目指す所存である。

参考文献

- 1) 蔣宇静, 東幸宏, 谷口硯土, 古賀大陸: 変状トンネルの覆工内面補強設計に用いる解析モデル化手法の提案, トンネルと地下, 第524号, pp.69-77, 2014.
- 2) (社)日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】, p.27, pp.196-197, p.213, 2015.
- 3) 宇都宮隆, 米田裕樹, 草場雅哉, 呉学震, 野口捺菜, 蔣

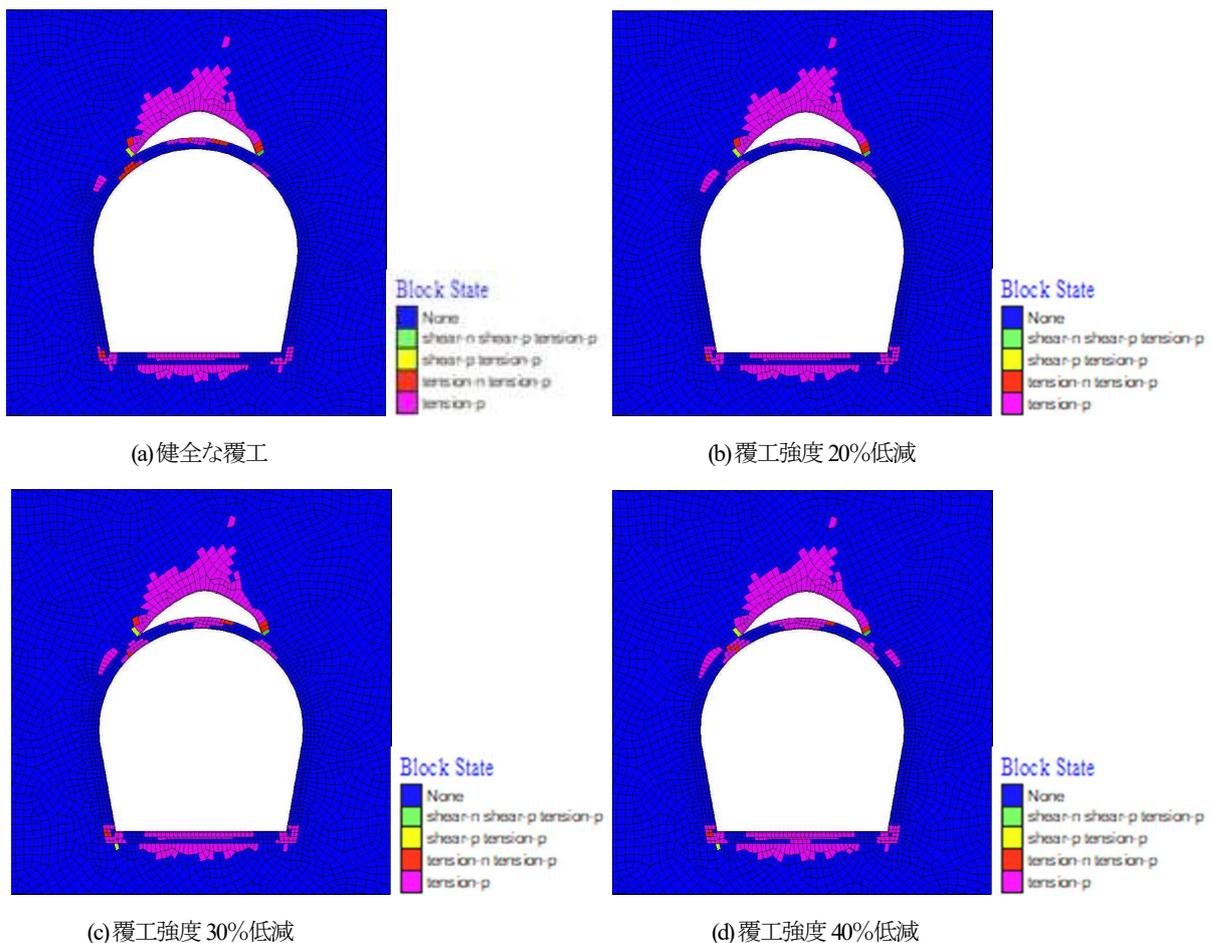


図-16 背面空洞が覆工強度の低下に与える影響

宇静：老朽化トンネルにおける覆工表面ひび割れ分布の評価，トンネル工学報告集，第27号，pp.205-209，2017.

- 4) 蒋宇静，谷川征嗣，山内淑人，安田亨，田近宏則：常時微動測定に基づくトンネル覆工の健全度評価手法の提案，トンネル工学報告集，第20号，pp.205-209，2010.
- 5) 半田兼一，大西有三，西山哲，ほか：デジタル画像処理を利用したひび割れ抽出による道路トンネル健全性評価，第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.13-18，2008.
- 6) Y. Gao, Y. Jiang, and B. Li: Estimation of effect of voids on frequency response of mountain tunnel lining based on microtremor method, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 42, pp. 184-194, 2014.
- 7) Xuezen Wu, Yujing Jiang, Kusaba Masaya, Tetsuya Taniguchi and Takahide Yamato: Study on the Correlation of Vibration Properties and

Crack Index in the Health Assessment of Tunnel Lining, *Shock and Vibration*, Volume 2017, Article ID 5497457, pp.1-9, 2017.

- 8) (社) 土木学会：トンネルの変状のメカニズム，p.45, pp.113-114，2003.
- 9) 小島芳之，朝倉俊弘，野城一栄，松長剛：変状トンネル対策工の骨組み解析によるシュミレーション，トンネル工学研究論文報告集，第7巻，pp.39-46，1997.
- 10) 蒋宇静，棚橋由彦，川田秋晶仁：道路トンネル変状予測モデルの検討と補強工法効果の評価への適用，長崎大学研究報告集，第37巻68号，pp.73-82，2007.

(2018.8.10受付)

STUDY ON TUNNEL SOUNDNESS EVALUATION METHOD BASED ON SURFACE CRACK DISTRIBUTION AND VIBRATION CHARACTERISTICS OF LINING

Tetsuya TANIGUCHI, Hiroki YONEDA, Masaya KUSABA and Yujing JIANG

The aged tunnels keep continuously increasing, which require effective inspection methods to assess their health conditions. In this study, the surface crack distribution on lining and in situ acceleration wave measurements were carried out to indicate the microtremor characteristics of an aged tunnel in Oita prefecture, and the correlations of lining surface cracks and lining back voids were investigated in detail. In particular, the larger the lining back voids, the larger the value of the vibration Fourier spectrum, and the difference between the unhealthy part and the healthy part of lining was also clarified. Furthermore, due to the presence of the lining back voids increases the loose area on the tunnel crown, a countermeasure work to prevent collapse is needed and its validity is shown by the numerical analysis with the ground degradation model.