論文　NATM トンネル覆工コンクリートの変状に関する点検データの分析

岩間　慧大*1・細田　暁*2

要旨：本研究では，道路の NATM トンネルの点検データから，うき・はく離・はく落等の発生状況を分析した。施工目地の近傍で，特に天端や肩部でうき・はく離・はく落の発生頻度が高くなる傾向が確認された。施工目地から離れた位置でのうき・はく離・はく落の約 9 割が色むらと関係していた。52 本のトンネルの点検データの分析から，ひび割れや豆板等の他の変状に比べて，うき・はく離・はく落では，危険度の高い変状の割合が高いことが示され，第三者被害を軽減する観点で，施工中にうき・はく離・はく落を抑制することの重要性を指摘した。

キーワード：点検データ，変状，うき，はく離，はく落，施工目地，色むら，目視評価法

1. はじめに

NATM トンネルの二次覆工コンクリートは，その形状・寸法からコンクリート施工の作業空間が狭く，密実で均質なコンクリートとするための打込みや締固めが容易ではない。また，一般的に二次覆工コンクリートの施工においては脱型時の材齢が小さく，打込みの翌日に脱型される場合も非常に多い。このような特殊な施工条件に起因して，施工時に不具合が生じるリスクが懸念される。施工時に生じる不具合は，将来の供用中に第三者被害を引き起こす変状に進展する可能性がある。

本研究では，道路の NATM トンネルの点検データを分析し，うき・はく離・はく落等の第三者被害を引き起こす可能性のある変状の発生状況の分析と，発生原因の推察を行う。一部の変状については，新設構造物においてそのような変状の発生を抑制するための方向性についても検討を行う。

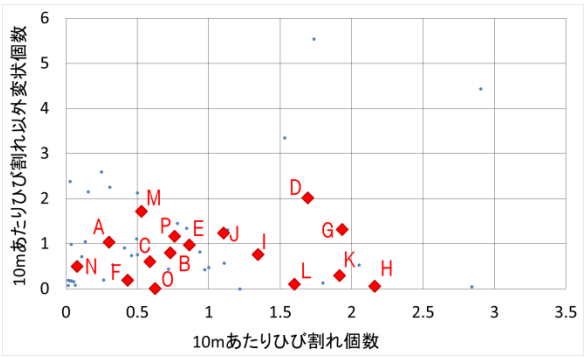
2. 点検データの概要と分析する変状

本研究での分析に用いたトンネル点検データについて説明する。国土交通省の定める点検要領 [1]に基づいて実施された点検のデータを活用した。本研究では，第三者被害を引き起こす可能性が大きい変状に的を絞って分析した。**表－1** に本研究の分析で扱った変状に関する説明を記す。うきが進行することではく離やはく落へと進展すると筆者らは考えているため，本研究では，うき・はく離・はく落を進行程度の異なる同一の現象として扱うこととした。

本研究では，52 本の NATM トンネルの点検データについて分析を行う。52 本のデータすべてを用いて，変状の種類ごとの変状数と危険度の割合を分析した。また，**表－2** に示す 16 本のトンネルを対象として，うき・はく離・はく落について詳細な分析を行った。

表－1　本研究で扱った変状に関する説明

種類	変状の説明
ひび割れ	点検調書において「ひび割れ」と記載されていたもの
うき	点検調書において「うき」と記載されていたもの
濁音	点検調書において「濁音」と記載されていたもの（分析内ではうきに含めた）
はく離 はく落	点検調書において「はく離」「はく落」と記載されていたもの
叩き落とし	点検調書において「叩き落とし」と記載されていたもの（分析内ではは く離・はく落に含めた）
豆板	点検調書において「豆板」と記載されていたもの



図－1　分析対象トンネルの位置付け

行った分析は，①施工目地近傍の変状，②施工目地から離れたうき・はく離・はく落である。**図－1** に，本研究で分析を行ったトンネルを含む 52 本のトンネルについ

*1 横浜国立大学　理工学部建築都市環境系学科都市基盤 EP　（学生会員）
*2 横浜国立大学　大学院都市イノベーション研究院准教授　博（工）　（正会員）

表－2　分析対象トンネル

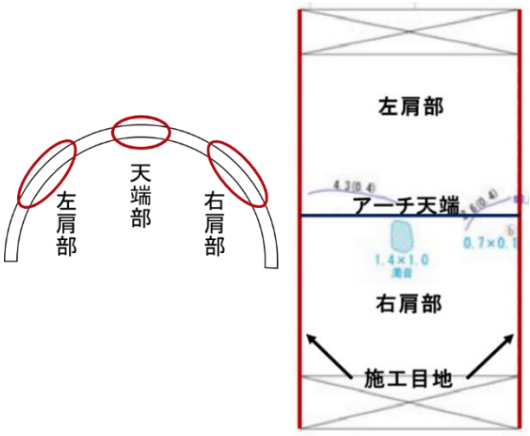
トンネル名	完成年次	点検年次	延長	行った分析（○印）	
				施工目地近傍の変状（うき・はく離・はく落・豆板）	施工目地から離れたうき・はく離・はく落
A トンネル	1992	2002	374	○	○
B トンネル	1992	2002	122	－	○
C トンネル	1993	2002	154	－	○
D トンネル	1993	2001	563	－	○
E トンネル	1996	2003	1287	－	○
F トンネル	2001	2003	774	－	○
G トンネル	2004	2011	301	○	－
H トンネル	2006	2009	432	－	－
I トンネル	2006	2009	386	○	○
J トンネル	2007	2009	1130	○	－
K トンネル	2007	2009	628	○	○
L トンネル	2007	2009	579	○	○
M トンネル	2007	2009	488	○	○
N トンネル	2007	2011	544	○	○
O トンネル	2007	2010	1230	－	－
P トンネル	2007	2009	4491.5	－	○

て，トンネル覆工コンクリート 1 ブロックにほぼ相当する 10m ごとのひび割れ個数と，ひび割れを除く変状の数を示した。ひび割れ以外の変状が特に多い一部のトンネルを含んではいないが，本研究で分析する 16 本のトンネルは，52 本のトンネルからは特に偏りなく選択されていることが分かる。

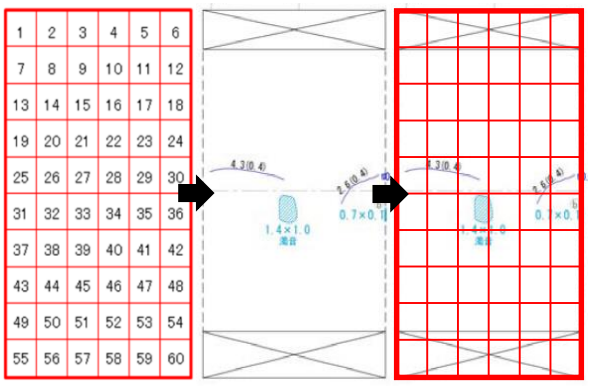
3. 点検データの分析手法

3.1 点検調書からのデータ抽出方法

分析した点検調書には，**図－2** に示すような変状を記録した展開図が含まれている。本研究では，この展開図に対して，**図－3** に示すように覆工コンクリート面を 60 分割する位置情報を与えた。トンネル軸方向に 6 分割，トンネル周方向に 10 分割とした。**表－3** に，各変状に対して，展開図における位置情報や，その他の属性を与えた例を示す。ひび割れに対しては，幅や長さも属性として与え，ひび割れ以外の変状には面積に関する情報も与えた。**図－3** のデータに示されるひび割れのように 60 分割の複数箇所にまたがっている場合は，「25」「26」「27」のように 3 つの位置にそれぞれカウントすることとした。また，施工目地に接しているものは「施工目地と接しているか」の欄に「○」と表記し，隣接ブロックに連続している変状については「施工目地と接しているか」の欄に「◎」と記録し，連続するブロック番号を合わせて表記して，データベースを構築した。本研究では，このよ



図－2　トンネル点検データに含まれる展開図



図－3　展開図に与えた位置情報

表－3　抽出情報例

スパン	変状名称	位置番号			施工目地と接しているか	面積(m²)	幅(mm)	長さ(m)
S006	ひび割れ	25	26	27	－	0.00172	0.4	4.3
S006	ひび割れ	29	30	35	◎7（ブロック 7 と連続）	0.00104	0.4	2.6
S006	はく落	30	－	－	○（接している）	0.05	－	－
S006	うき・はく離	33	－	－	－	1.4	－	－
S006	うき・はく離	36	－	－	○	0.07	－	－

うに構築したデータベースの一部を活用して分析した結果を示すが，一般に点検データを有効に活用するためには，PDF 形式の保存ではなく，変状の属性も適切に含んだエクセル等のデジタルデータベースの構築が重要であると考えている。

3.2 施工目地近傍の変状の分析

トンネル覆工コンクリートの施工目地近傍には変状が発生しやすいと思われ，中国地方整備局においても施工目地近傍の変状抑制対策を行うこととしている [2]が，変状の実態については十分に明らかにされているとは言えない。本研究では，点検データの展開図における変状に位置情報を与えたため，施工目地近傍の変状の発生頻度を算出することが可能である。

具体的には，**表－1** に記載した各変状について，展開図上の位置番号ごとに総数を求め，それをトンネルのブロック数で除すことで発生頻度を算出した。NATM トンネル覆工コンクリートの標準的なブロック長は 10.5m であるが，坑口部でブロック長が短い場合があり，非常避難帯を有する断面の大きなブロックでもブロック長が短い場合もあるが，本研究ではブロックあたりの変状の発生頻度とした。例えば，ブロック数が 25 のトンネルにおいて，変状種類「うき」に関して，位置番号 36 のカウント総数が 15 あった場合，その位置番号の 1 ブロックあたりの発生頻度は 15/25=0.60 と算出される。

3.3 施工目地から離れた位置における変状の分析

3.2 では施工目地近傍での変状についての分析方法を示した。実際のトンネルでは，施工目地から離れた場所でもうき・はく離・はく落は生じており，変状の程度が大きい場合には第三者被害を引き起こす可能性がある。また，点検調書の変状の写真を見ると，施工目地から離れた場所でのうき・はく離・はく落は，コンクリートの色むらや打重ね線と関連しているものが少なくないように思われた。

ここでは，**表－2** に示した 12 本のトンネルに対して，施工目地から離れた場所に発生したうき・はく離・はく落をすべて抽出し，点検写真を調べることで，色むらとの関係性を判定した。色むらと関係があると判定した変状は，**図－4** に示す色むらパターンのうちのいずれかに属した。1 つ目は，施工目地から離れた位置において，色むら部分とうき・はく離・はく落部分がほぼ一致しているもの（**図－4** 左），2 つ目は，うき・はく離・はく落部分の周囲に色むら部分が存在するもの（**図－4** 中央），3 つ目は，大きな色むら部分の一部分がうき・はく離・はく落部分となっているもの（**図－4** 右）である。それぞれの不具合が，上記の 3 つのパターンのどれに相当するかを調べた。

3.4 トンネルの変状の危険度の分析

トンネル点検調書においては，点検実施要領 [3]に基づいて各々の変状に対して**表－4** に示すような判定が行われている。ここでは，この判定結果を指標として活用し，52 本の NATM トンネルすべてを対象に，変状種類と危険度についての分析を行った。この 52 本の NATM トンネルは，1991 年～2011 年の 21 年間に建設されたトンネルであり，点検が行われたのが 2001 年～2012 年の 12 年

図－4　色むらパターン（黒線内はうき・はく離・はく落部分）

表－4　変状の判定区分とその定義 [3)]

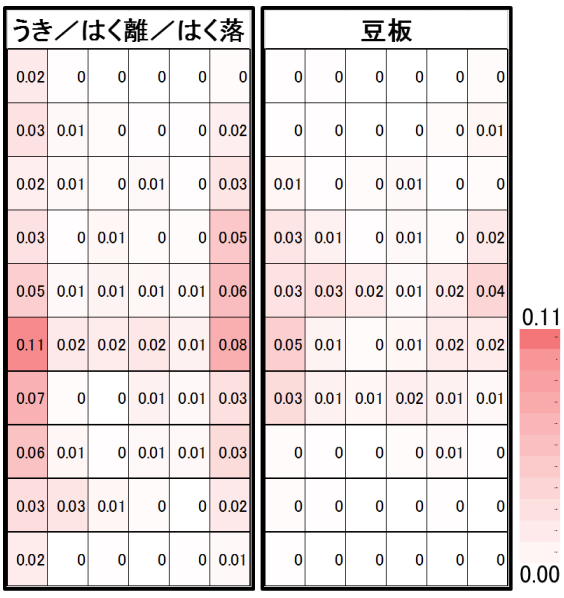
判定区分	判定の内容
A	変状が著しく通行車両の安全が確保できないと判断され，応急対策を実施した上で補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合。
B	変状があり，応急対策は必要としないが補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合。
S	変状がないか，あっても軽微で応急対策や標準調査の必要がない場合。

間である。また，建設されてから点検までに経過した年数が最も長いもので 11 年間となっている。

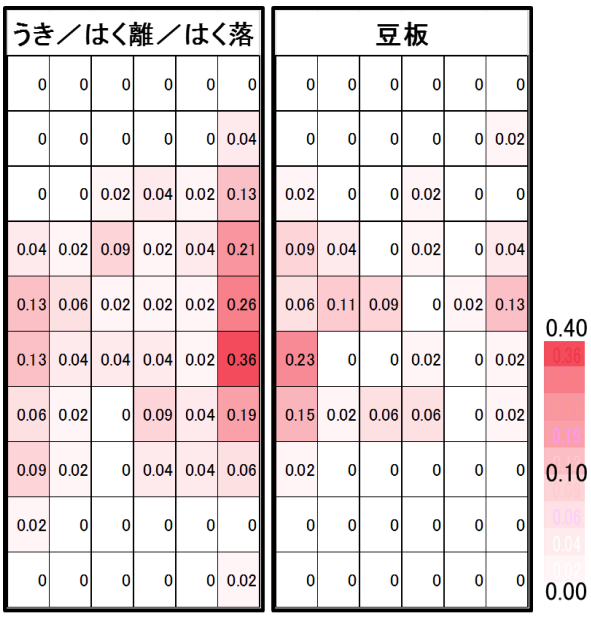
4. 分析結果と考察

4.1 施工目地近傍の変状

3.2 に示した方法で施工目地近傍の変状について 8 本トンネルに対して分析した結果について説明する。**図－5** には，うき・はく離・はく落を進行程度の異なる 1 つの事象であると考えた発生頻度図（左）と豆板の発生頻度図（右）を 8 本のトンネルの平均値を用いて示した。これを見ると，目地部の天端に近い箇所において，うき・はく離・はく落の変状の発生頻度が高いことが分かる。豆板もやや目地部での発生頻度が高い傾向が認められる。天端に近い位置でのうき・はく離・はく落は，第三者被害につながる危険性が高いと考えられる。



図－5　8 本のトンネル平均のうき・はく離・はく落（左）と豆板（右）の発生頻度（1 ブロックあたり）



図－6　M トンネルのうき・はく離・はく落（左）と豆板（右）の発生頻度（1 ブロックあたり）

図－6 には，目地部の変状を分析した 8 本のトンネルのうちで変状個数が最も多かった M トンネルについて，うき・はく離・はく落と豆板の発生頻度を示した。M トンネルにおいては，うき・はく離・はく落の目地部での発生頻度が極めて高く，8 本のトンネル平均の 3 倍以上の値を示し，天端部では約 3 ブロックに 1 つの変状が生じていた。また，うき・はく離・はく落の発生する目地と逆側の目地において豆板が多数発生していることが読み取れる。トンネルの天端部の打込みにおいて，吹上げ方式を用いることがほとんどであるが，吹上げ口に近い目地に豆板が生じやすいと思われる。吹上げ口から離れた側の目地は，吹上口から投入したコンクリートが流れて到着し，ブリーディング水等を含む脆弱なコンクリートが偏在する可能性があり，うき・はく離・はく落につながりやすい可能性を筆者らは考えている。

4.2 施工目地から離れた位置における変状

3.3 で示した方法で施工目地から離れた位置における分析を行ったところ，うき・はく離・はく落と色むらに関係があることが分かった。**表－5** には，うき・はく離・はく落の個数とそれら 3 変状の総数を示した。また，**図－4** に示した 3 種類の色むらとの関係のいずれかに相当すると判断したうき・はく離・はく落の個数とその割合も示した。施工目地から離れた位置にうき・はく離・はく落が全くないトンネルもある。しかし，施工目地から離れた場所でのうき・はく離・はく落が発生しているトンネルでは，約 90%の変状が色むらと関係があるということが分かった。ただし，色むらがある場合にそれがすべてうき・はく離・はく落につながることを意味するわ

けでは決してないことに留意が必要である。

現在，東北地方整備局では，施工中に生じる不具合を抑制するために，施工状況把握チェックシートと目視評価法を活用した品質確保の取組みが実践されている[4), 5), 6), 7)]。トンネルの二次覆工コンクリートの目視評価法においては，「色むら・打重ね線」の評価項目があり，特に側壁から天端付近の色むら・打重ね線を抑制するための努力が重ねられている[7)]。本研究での分析結果を踏まえれば，「色むら・打重ね線」を抑制するための努力は，施工目地から離れたうき・はく離・はく落を低減することにもつながると考えられる。

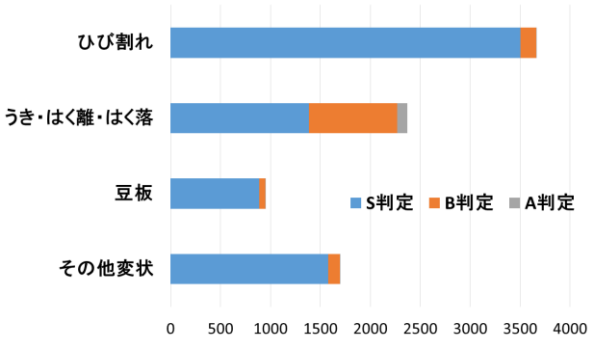
表－5　色むらと関係のある変状割合

トンネル	うき	はく離	はく落	3 変状総数	色むら関係有	割合(%)
A	0	0	0	0	0	-
B	0	0	0	0	0	-
C	0	0	1	1	1	100
D	0	2	0	2	1	50
E	4	0	7	11	11	100
F	0	0	5	5	5	100
I	0	6	0	6	6	100
K	0	4	4	8	7	87.5
L	0	0	0	0	0	-
M	6	0	9	15	12	80
N	0	2	0	2	2	100
P	31	0	14	45	38	84.4
全体	41	14	40	95	83	**87.4**

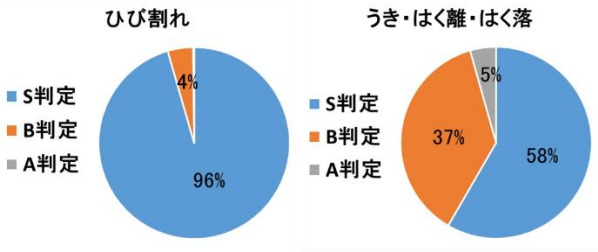
4.3 トンネルの変状の危険度の分析

変状ごとの判定個数を示した**図－7**，**図－8** を見ると，ひび割れの発生個数は非常に多いが，危険度の高い A 判定および B 判定の割合はうき・はく離・はく落において顕著に高く，A 判定が 5%，B 判定が 37%であった。したがって，本研究で分析を行ったうき・はく離・はく落を抑制していくことは，トンネルの二次覆工コンクリートにおいて第三者被害につながる変状を抑制する観点で極めて重要であると言える。

ひび割れに関しては，**図－7**，**図－8** から，非常に個数が多いが，A 判定のものは 52 本のトンネルの中では 0%に等しく，B 判定の割合は 4%であった。**図－1** を見ると，ほとんどひび割れの発生していないトンネルも存在するため，ひび割れを抑制する方策は存在すると思われる。品質確保の積極的な取組みがなされている東北地方整備局のトンネル群において，ひび割れの発生状況がどのような結果になるか，いずれ点検データで明らかにされると思われるが，ひび割れ抑制の意義についても議論が重ねられることを期待したい。



図－7　変状種類別の判定結果



図－8　ひび割れとうき・はく離・はく落の判定結果の割合

5.まとめ

本研究では，道路トンネル点検データを用い，NATM トンネル覆工コンクリートの変状について分析を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

(1) うき・はく離・はく落は施工目地の近傍に発生しやすく，天端や肩部に多くなる傾向が見られた。比較的変状の多い M トンネルにおいては，うき・はく離・はく落は目地部での発生頻度が極めて高く，天端部では約 3 ブロックに 1 つ発生していた。また，M トンネルにおいては，うき・はく離・はく落の発生する目地と逆側の目地において豆板が多数発生しており，この原因について考察した。

(2) 施工目地から離れた位置におけるうき・はく離・はく落の約 9 割が色むらと関係していた。施工段階で色むら・打重ね線を評価項目の一つとして，これを低減する努力を行う目視評価法の活用が，このようなうき・はく離・はく落を抑制する意味でも有効であるという考えを示した。

(3) 52 本のトンネルのデータの分析から，他の変状に比べると，うき・はく離・はく落において危険度の高い変状の割合が高かった。第三者被害の危険性を抑制する観点で，施工中に二次覆工コンクリートのう

き・はく離・はく落を抑制することの意義を示した。

参考文献

1) 国土交通省：総点検実施要領（案）【道路トンネル編】，2013.2
2) 国土交通省中国地方整備局道路部：トンネル覆工コンクリートの長期保証について
3) 国土交通省：総点検実施要領（案）【道路トンネル編】（参考資料），2013.2
4) 細田暁，二宮純，森岡弘道，阿波稔，田村隆弘：施工把握チェックシートによるコンクリート構造物の品質確保と協働関係の構築，コンクリートテクノ，Vol.34，No.5，pp.63-82，2015.5
5) 細田暁：復興道路における新設コンクリート革命，コンクリートテクノ，34 巻，4 号，pp.70-76，2015.4
6) 細田暁：復興道路での品質確保と人財育成，コンクリート工学，53 巻，1 号，pp.66-70，2015.1
7) 伊藤忠彦，細田暁，林和彦，西尾隆，八巻大介：覆工コンクリート品質向上の取り組みと表層品質の評価，トンネル工学報告集，24 巻，I-4，pp.1-9，2014.12