

長期計測結果にもとづいた トンネル覆工の挙動に関する考察

笹田 俊之¹・砂金 伸治²・石村 利明²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: t-sasada44@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

道路トンネルでは点検や対策の実施を通じて適切に維持管理を行うことが求められており、覆工コンクリート等への近接目視および打音検査等により得られる情報をもとにトンネルの状態を把握している。一方、実際の覆工コンクリートにおける変状、特にひびわれの長期的な挙動等のメカニズムについては解明されていない部分も残されている。

本研究では、実際のトンネルにおいて、継続してトンネルのひびわれに関するデータを収集し、その長期的な挙動について検討を行った。その結果、ひびわれの評価には乾燥収縮に伴う季節の影響を加味する必要があること、ひびわれ密度は一定期間の後にほぼ収束する傾向があることがわかった。

Key Words : tunnel, lining, crack, monitoring

1. はじめに

近年、道路構造物における維持管理の重要性が高まっており、適切な点検や対策を実施して構造物の長寿命化を図ることが求められている。道路トンネルの点検においては、定められた要領や便覧等^{1)~2)}にもとづいて、覆工に対して目視および打音検査等を実施し、それにより得られる情報をもとにトンネルの状態を把握している。しかし、実際の覆工コンクリートにおける変状の発生や進展のメカニズムについては解明されていない部分も残されている。

著者らは、覆工コンクリートに関する長期的な挙動等のメカニズムについて知見を得るため、実際のトンネルにおいて特にひびわれに着目し、継続してデータを収集し、その挙動について検討を行ってきた^{3)~5)}。本稿では過去10年程度にわたって行った計測をもとに考察した結果について報告する。

下で述べる。

(1) Aトンネルの概要

Aトンネルは2001年完成の2車線道路トンネル³⁾で、NATMにより施工されている。対象とした計測区間は覆工に鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと呼ぶ。)を用いた区間が2スパン(それぞれスパンA, Bと称する, 合計延長20m)、プレーンコンクリートを用いた区間が1スパン(スパンC, 延長10m)、合計3スパンである。図-1にAトンネルの計測区間の縦断方向の位置、表-1にAトンネルの各スパンにおける計測項目、図-2に断面内の計

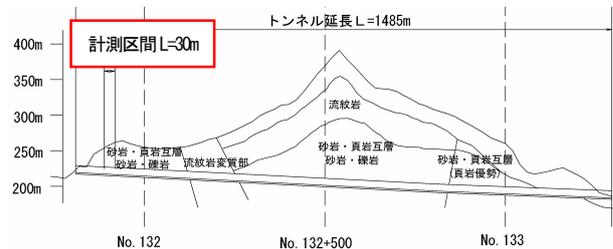


図-1 Aトンネルの縦断方向の計測位置

2. 計測実施トンネルの概要

本稿で対象としたトンネルはA, BおよびCトンネルの3トンネルである。これらのトンネルにおいて覆工コンクリートのひびわれの状況を観察するとともに覆工の挙動に関する諸データを収集した。各トンネルの概要を以

表-1 Aトンネルの計測項目

スパン	計測項目					
	ひびわれ	覆工内温度	覆工応力	変位計測	坑内温湿度	坑内風速
A	○	○	○	○		
B	○	○	○	○		
C	○	○	○	○		

測位置を示す。なお、スパン A および B において使用した SFRC は同一の仕様であり、3 スパンとも支保パターンは D I パターンである。また、覆工の打設は 2001 年 2 月に行われた。

(2) Bトンネルの概要

B トンネルは 2004 年完成の 2 車線道路トンネルで、NATM により施工されている。対象とした計測区間は覆工にプレーンコンクリートを用いた区間が 2 スパン(スパン A, B, 合計延長 19.75m), SFRC を用いた区間が

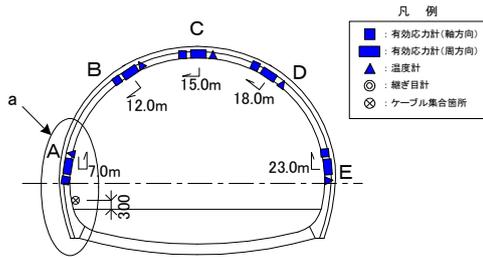


図-2 A トンネルの断面内の計測位置

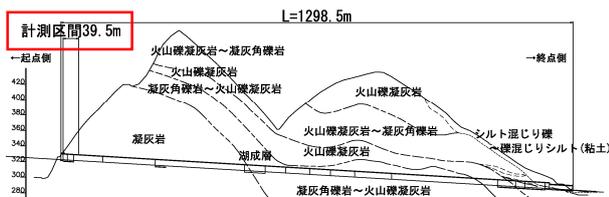
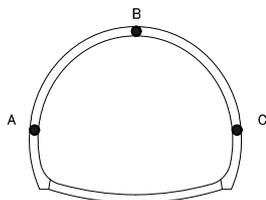


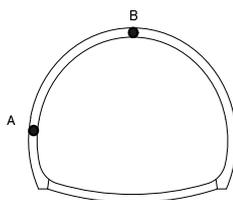
図-3 B トンネルの縦断方向の計測位置

表-2 B トンネルの計測項目

スパン	計測項目					
	ひびわれ	覆工内温度	覆工応力	変位計測	坑内温湿度	坑内風速
A	○					
B	○		○	○	○	○
C	○	○	○	○		
D	○					



(a) 覆工応力および覆工内温度



(b) 坑内温湿度および坑内風速

図-4 B トンネルの断面内の計測位置

1 スパン(スパン C, 延長 9.25m), 単鉄筋(DIIIa パターン)の区間を 1 スパン(スパン D, 延長 10.5m), 合計 4 スパンである。図-3に B トンネルの計測区間の縦断方向の位置, 表-2に B トンネルの各スパンにおける計測項目, 図-4に断面内の計測位置を示す。なお, スパン A の支保パターンは C II, スパン B~C の支保パターンは D I である。また, 覆工の打設は 2004 年 11 月に行われた。

(3) Cトンネルの概要

C トンネルは2010年完成の2車線道路トンネルで、NATMにより施工されている。対象とした計測区間は覆工にプレーンコンクリートを用いた区間を2スパン(スパンA, G, 合計延長21m), SFRCを用いた区間を4スパン(スパンB, C, D, E, 合計延長42m), 樹脂繊維補強コンクリートを用いた区間を1スパン(スパンF, 10.5m), 合計7スパンである。図-5にCトンネルの計測区間の縦断方向の位置, 表-3にCトンネルの各スパンにおける計測項目, 図-6に断面内の計測位置を示す。なお, 使用した鋼繊維の仕様はスパンBは混入率0.5%, 繊維長60mm, スパンCは混入率0.3%, 繊維長60mm, スパンDは混入率0.5%, 繊維長30mm, スパンEは混入率0.3%, 繊維長30mmである。また, 樹脂繊維を使用したスパンFでは混入率0.5%, 繊維長45mmであり, 7スパンとも支保パターンはC II である。また, 計測区間の覆工の打設は2004年8月に行われた。

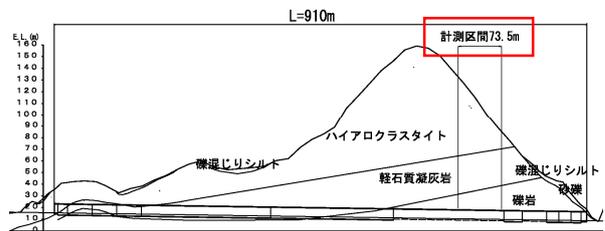


図-5 C トンネルの縦断方向の計測位置

表-3 C トンネルの計測項目

スパン	計測項目					
	ひびわれ	覆工内温度	覆工応力	変位計測	坑内温湿度	坑内風速
A	○	○	○	○	○	○
B	○		○	○		
C	○			○		
D	○			○		
E	○			○		
F	○			○		
G	○			○		

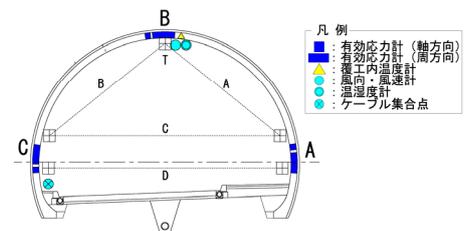


図-6 C トンネルの断面内の計測位置

3. 計測結果

(1) Aトンネルの計測結果

図-7および図-8に上半水平測線位置での内空変位および天端沈下の経時変化を示す。いずれのスパンも計測開始からの最大変位量は 3mm 以下で、大幅な断面の縮小は見られなかった。また、詳細は後述するが、覆工応力等の結果にも急激な変化が見られないことから、本計測区間では外力の作用はないものと想定される。

図-9に A トンネルの対象計測区間における 2013 年 9 月時点で計測された幅 0.05 mm以上のひびわれの変状展開図を示す。また、各スパンにおいて最大のひびわれ幅が計測された箇所を赤丸で図中に示した。また、図-10に各スパンにおけるひびわれ密度の経時変化を示す。なお、本研究におけるひびわれ密度は図-9に示したひびわれの総ひびわれ長を覆工コンクリートの打設単位であるスパンの表面積で除して求めた。図-9より、いずれのスパンも天端部周辺にひびわれが発生していることがわかる。なお、スパン C のみ両側の側壁部に横断方向のひびわれが認められた。これらのひびわれは上述のように外力の作用がないと想定される条件で発生していると考えられる。また、図-10より覆工打設後 5 年以降のひびわれ密度は一定あるいは増加する場合でもわずかな傾向が見られた。また、スパン A(SFRC)、C(プレー

ン)、B(SFRC)の順に大きい結果となったが、その最大の差は 2006 年の時点で 0.07m^2 であり、最新の計測までその差はほぼ変わっていない。

図-11に A トンネルの各スパンにおいて図-9に示した最大のひびわれ幅が得られた箇所のひびわれ幅の経時変化を示す。また、スパン A の覆工内温度の経時変化を図-12に示す。なお、図中の覆工内温度はスパン A のものを示しているが、その他のスパンも同様の結果が得られた。ここで、覆工打設から 2006 年までは計測回数が少ないため評価が難しいが、いずれのスパンにおいても年間を通じて覆工内温度が最も低くなる 1~2 月から若干ずれてひびわれ幅の年間を通じた極大値が得られ、年間を通じて覆工内温度が最も高くなる 7~8 月から若干ずれてひびわれ幅の年間を通じた極小値が得られる傾向が見られ、ひびわれ幅は覆工内温度に連動して変化して

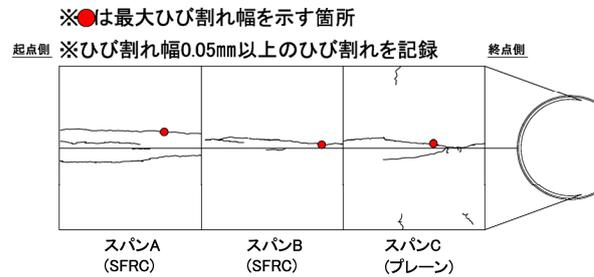


図-9 Aトンネルの変状展開図(2013年9月時点)

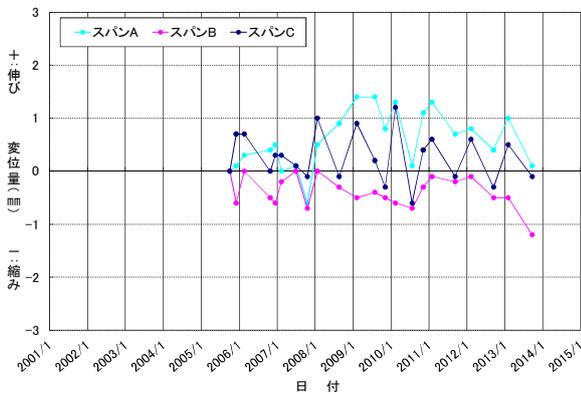


図-7 Aトンネルの内空変位(上半水平測線位置)の経時変化

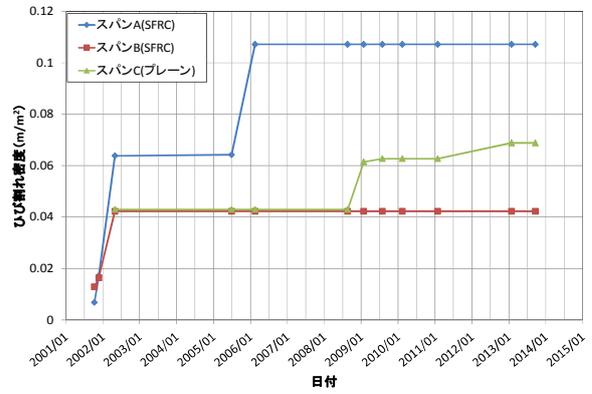


図-10 Aトンネルのひびわれ密度の経時変化

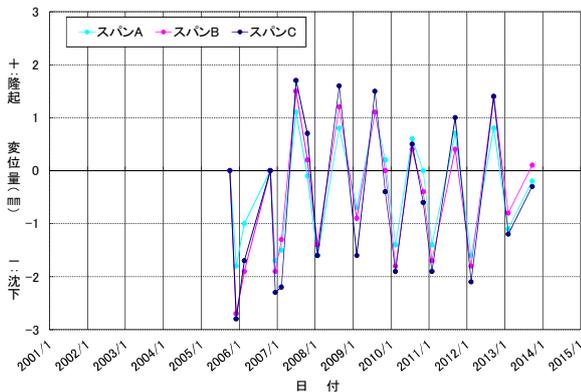


図-8 Aトンネルの天端沈下の経時変化

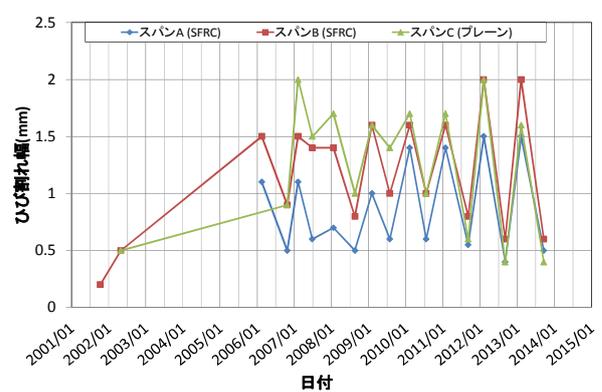


図-11 Aトンネルのひびわれ幅の経時変化

いると考えられる。

図-13にスパン A の覆工応力の経時変化を示す。図-13および図-12より、一部で欠測があるが、軸方向応力および周方向応力は年間を通じて覆工内温度が低くなる1~2月ごろから若干ずれて年間を通じた極小値が得られ、年間を通じて覆工内温度が高くなる7~8月ごろから若干ずれて年間を通じた極大値が得られ、覆工内温度の季節変化に応じて変動する傾向が見られた。なお、同計測を実施したスパン B および C でも同様な傾向が見られた。

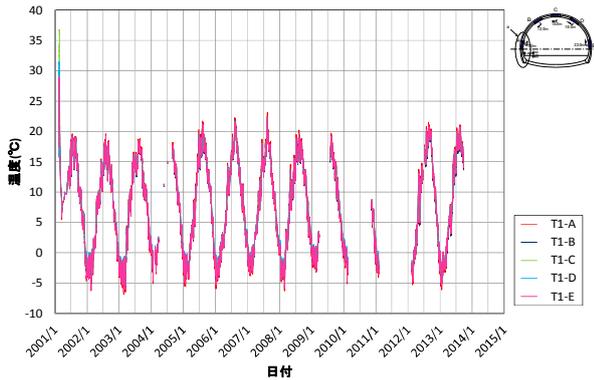
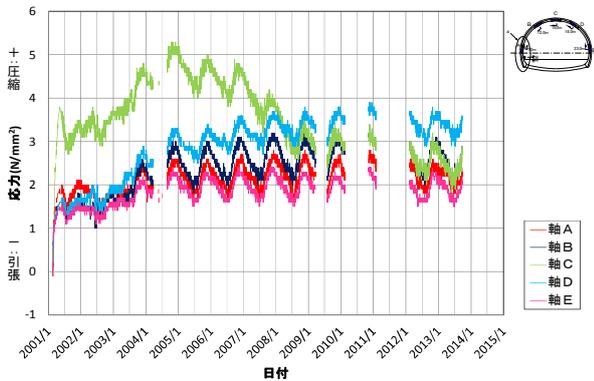
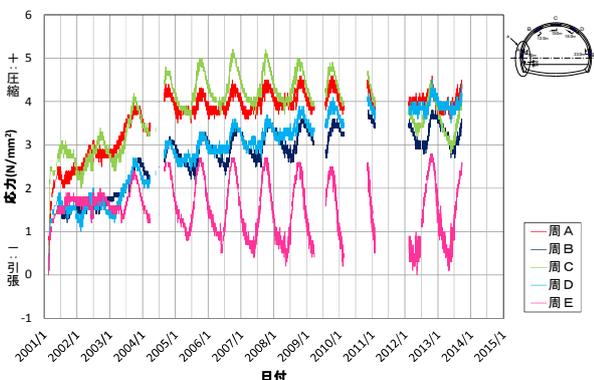


図-12 A トンネルの覆工内温度の経時変化(スパン A)



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図-13 A トンネルの覆工応力の経時変化(スパン A)

(2) Bトンネルの計測結果

図-14および図-15に上半水平測線位置の内空変位および天端沈下の経時変化を示す。いずれのスパンも内空変位の最大変位量は3mm以下であった。なお、天端沈下の最大変位量はスパンCで16mmを示し、経時変化とともに沈下が進行している結果が得られた。変状の原因の推定に必要な情報が十分でないものもあると同時に、変位計測と後述するひびわれと覆工応力の結果を総合的に考えるとばらつきも含まれていることから外力の作用等の有無を判断することは現時点では難しいと考えられる。

図-16にBトンネルの対象計測区間における2013年9月時点で計測された幅0.05mm以上のひびわれの変状展開図を示す。また、各スパンにおいて最大のひびわれ幅が計測された箇所を赤丸で図中に示した。図-17に各スパンにおけるひびわれ密度の経時変化を示す。なお、本研究におけるひびわれ密度はAトンネルと同じ方法で求めた。これより、覆工打設後6年以降のひびわれ密度は一定あるいは増加する場合でもわずかである傾向が見られた。ひびわれ密度はスパンD(単鉄筋), A(プレーン), B(プレーン), C(SFRC)の順に大きい結果となった。一方で、スパンA~Cではひびわれ幅0.2~0.4mmのひびわれが多く、スパンDではひびわれ幅0.1mm未満のひびわれが多かった。このことから、スパンDではひびわれの本数は多いもののその幅は小さく、鉄筋の存在によりひびわれが細

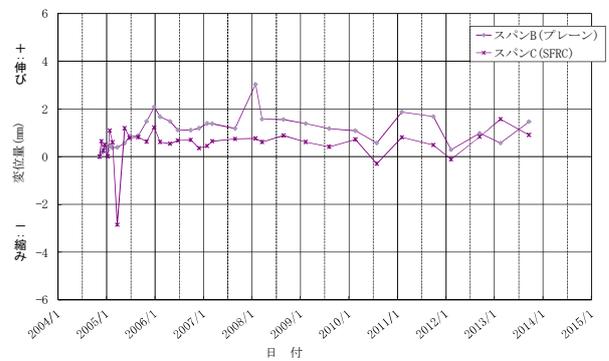


図-14 Bトンネルの内空変位(上半水平測線位置)の経時変化

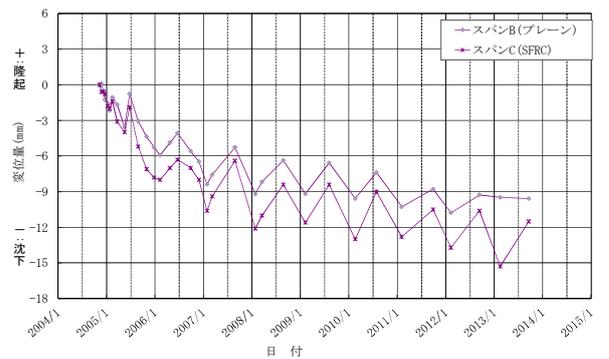


図-15 Bトンネルの天端沈下の経時変化

かく発生していると考えられる。

図-18に B トンネルの各スパンにおいて図-16に示した最大のひびわれ幅が得られた箇所のひびわれ幅の経時変化を示す。また、スパン C の覆工内温度の経時変化を図-19、坑内温湿度の経時変化を図-20に示す。図-18~20 より、覆工打設から 2009 年までは計測回数が少ないため評価が難しいが、2009 年以降はいずれのスパンにおいても A トンネルと同様に覆工内温度および坑内温湿度の季節変動に応じてひびわれ幅が変動する傾向が見られた。また、スパン A~C はひびわれ幅 0.2~0.4mm のひびわれが多く、最大ひびわれ幅は 1.1~1.6mm、スパン D(単鉄筋)はひびわれ幅 0.1mm 未満のひびわれが多く、最大ひびわれ幅は 0.7mm と、ひびわれ密度が最も大きかったスパン D がひびわれ幅が最も小さかった。

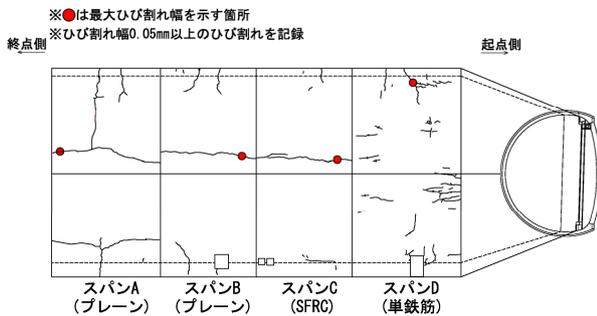


図-16 Bトンネルの変状展開図(2013年9月時点)

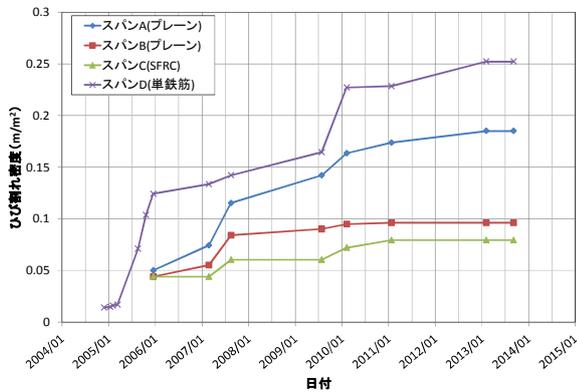


図-17 Bトンネルのひびわれ密度の経時変化

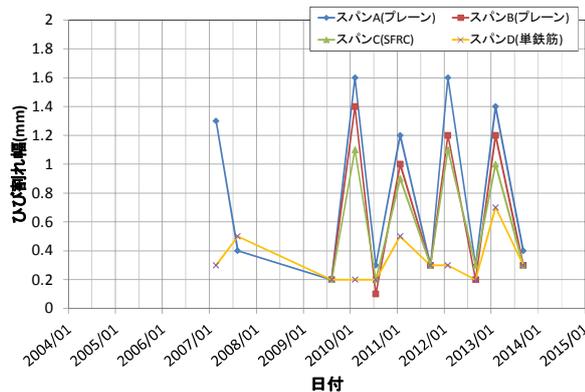


図-18 Bトンネルのひびわれ幅の経時変化

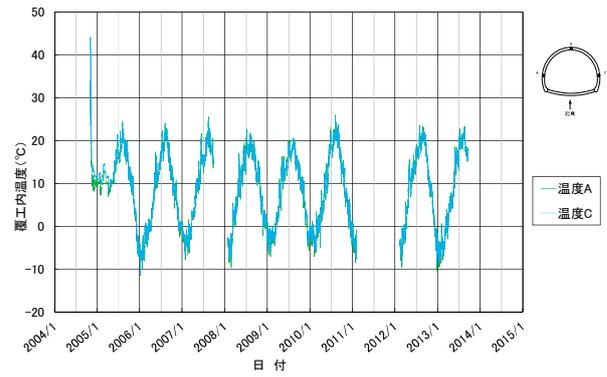


図-19 Bトンネルの覆工内温度経時変化(スパンC)

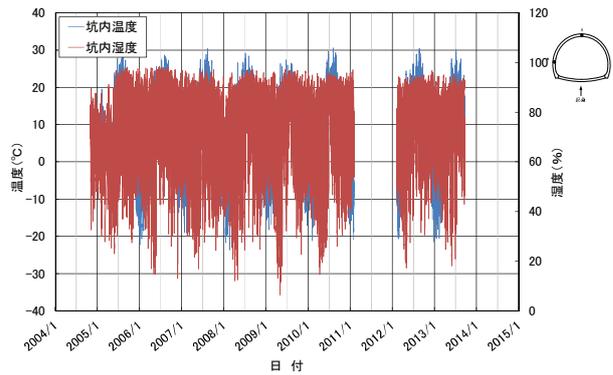
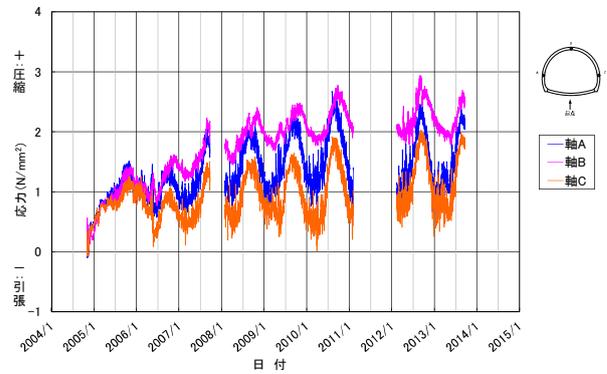
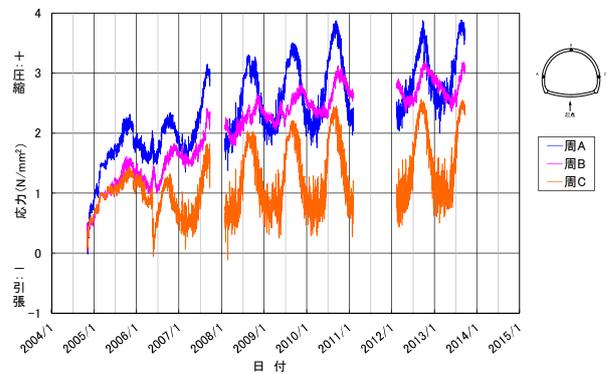


図-20 Bトンネルの坑内温湿度



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図-21 Bトンネルの覆工応力の経時変化(スパンC)

図-21にスパンCにおける覆工応力の経時変化を示す。図-19~21より、一部で欠測があるが、軸方向応力および周方向応力はAトンネルと同様に覆工内温度および坑内温湿度等の季節変化に応じて変動する傾向が見られた。また、季節変動を除けば覆工打設後6年程度で覆工応力が収束傾向にあることがわかった。また、図-22に坑内風速の経時変化を示す。なお、明らかな特異値は除外して図示している。坑内風速は最大で6.0m/s、平均風速は0.05m/sであった。ひびわれが発見された前後の時期とそれ以外の時期を比較したが、いずれも明確な差異は認められず、風の有無や強弱と覆工の挙動との関連性については判断できなかった。なお、同計測を実施したスパンBでも同様な結果が得られた。

(3) Cトンネルの計測結果

図-23に上半水平測線位置での内空変位、図-24に天端沈下の経時変化を示す。どちらの変位も、いずれのスパンにおいても計測開始からの最大変位量は4mm以下で、大幅な断面の形状の変化は見られなかった。また、詳細は後述するが、覆工応力等の結果にも急激な変化が見られないことから、本計測区間では外力の作用はないものと想定される。

図-25にCトンネルの2013年11月時点で計測されたひびわれの変状展開図を示す。また、各スパンにおいて最

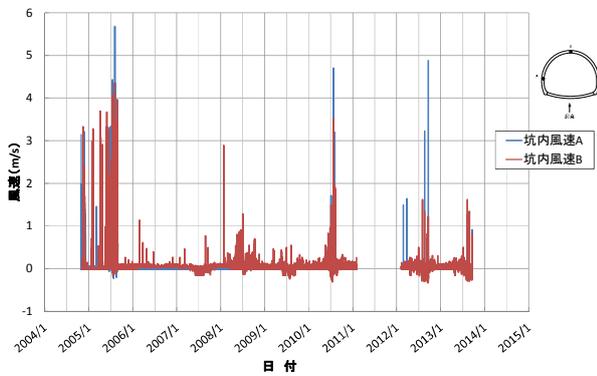


図-22 Bトンネルの坑内風速

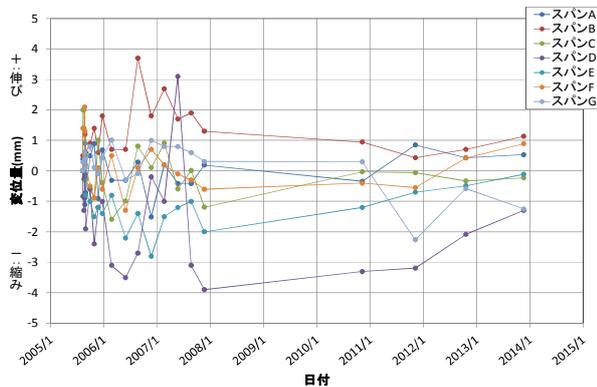


図-23 Cトンネルの内空変位(上半水平測線)の経時変化

大のひびわれ幅が計測された箇所を赤丸で図中に示した。なお、Cトンネルではひびわれの発生が少なく、ひびわれ幅が非常に小さいため、全てのひびわれを抽出した。

図-26に図-25の各スパンにおけるひびわれ密度の経時変化を示す。なお、本研究におけるひびわれ密度はAトンネルと同じ方法で求めた。Cトンネルは、計測回数が少なく今後のさらなるデータの蓄積が必要であるが、ひびわれ密度が定期的に算定できたスパンが限られており、スパンF(樹脂繊維)、E(SFRC)の順に大きい結果となった。しかしながら、その最大差は2012年11月の時点で0.025m²/m²程度であり、最新の計測までその差はほぼ変わっていない。なお、スパンC(SFRC)およびG(プレーン)はひびわれが確認されたのが最新の計測の1回のみで、ひびわれ密度の変化を把握することができなかった。また、スパンA(プレーン)、B(SFRC)、D(SFRC)は本計測期間ではひびわれの発生が確認できなかった。なお、

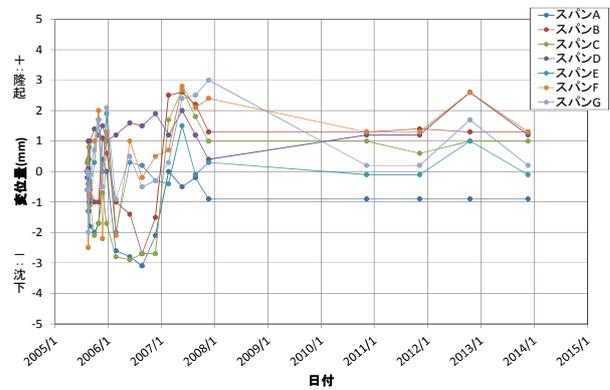


図-24 Cトンネルの天端沈下の経時変化

※ ●は最大ひび割れ幅を示す箇所

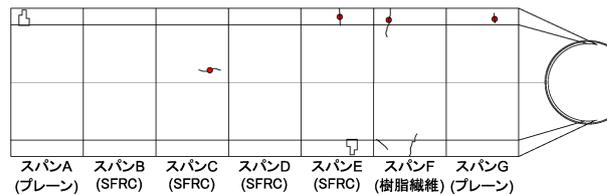


図-25 Cトンネルの変状展開図(2013年11月時点)

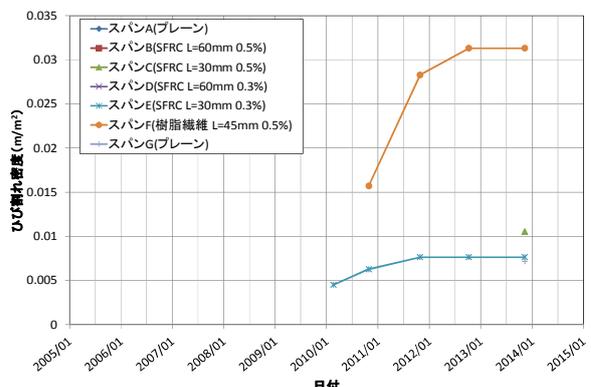


図-26 Cトンネルのひびわれ密度の経時変化

覆工コンクリートの打設から計測開始までの時間に差があり、その間の挙動についてはデータが欠損していることに注意する必要がある。

図-27にCトンネルの各スパンにおいて図-25に示した最大のひびわれ幅が得られた箇所のひびわれ幅の経時変化を示す。また、スパン A の覆工内温度の経時変化を図-28、坑内温湿度の経時変化を図-29に示す。図-27より、ひびわれが定期的に計測できたスパンはスパン E および F のみに限られるが、計測されたひびわれ幅はひびわれが確認されたときから変動が少ないと考えられる。なお、スパン E および F で確認されたひびわれの計測時期は10月後半から11月後半で、図-28および図-29より各計測時期における覆工内温度や坑内温湿度等に挙げられる坑内環境はほぼ同条件であったと考えられる。

図-30にスパン A における覆工応力の経時変化を示す。図-28~30より、一部で欠測があるが、軸方向応力および周方向応力はAトンネルと同様に覆工内温度および坑内温湿度等の季節変化に応じて変動する傾向が見られた。また、図-31に坑内風速の経時変化を示す。坑内風速は最大で1.7m/s、平均風速は0.5m/sであった。ひびわれが発見された前後の時期とそれ以外の時期を比較したが、いずれも明確な差異は認められず、風の有無や強弱と覆工の挙動との関連性については判断できなかった。なお、同計測を実施したスパン B でも同様な傾向が見られた。

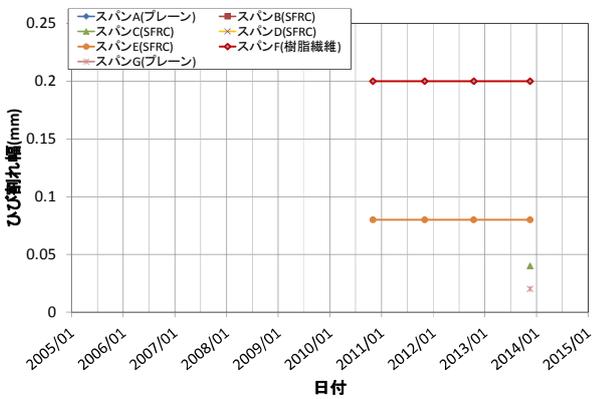


図-27 Cトンネルのひびわれ幅および覆工内温度の経時変化

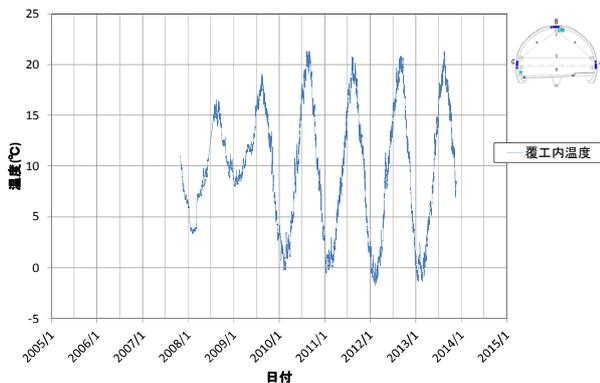


図-28 Cトンネルの覆工内温度の経時変化(スパン A)

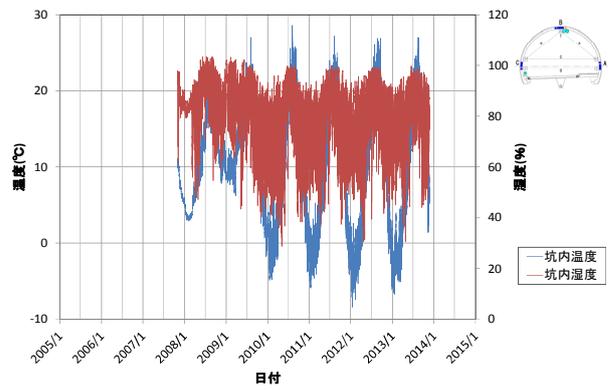
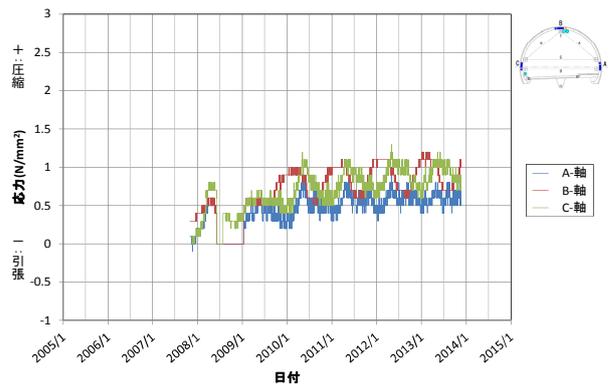
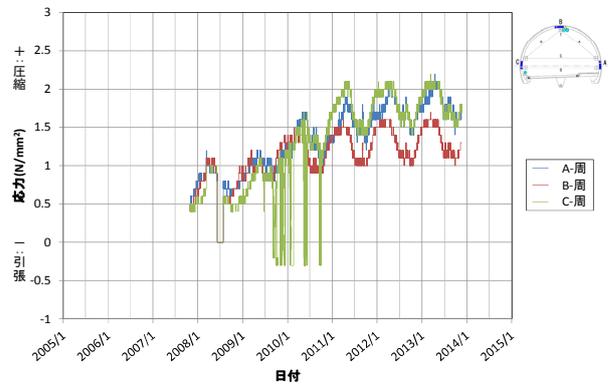


図-29 Cトンネルの坑内温湿度(スパン A)



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図-30 Cトンネルの覆工応力の経時変化(スパン A)

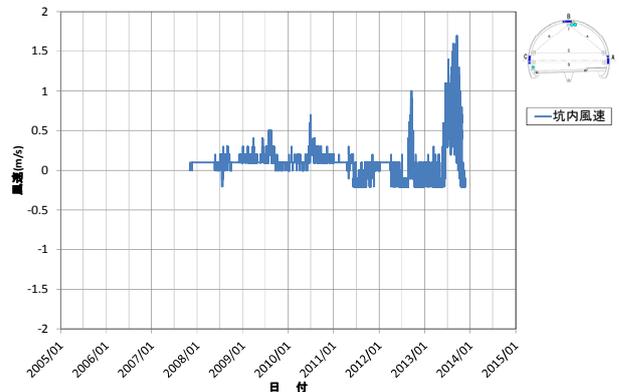


図-31 Cトンネルの坑内風速(スパン A)

4. まとめと今後の課題

本稿は実際のトンネルにおける覆工コンクリートに関する長期的な挙動等のメカニズムについて知見を得るため、過去10年程度にわたり継続して覆工の挙動に関する諸データを収集し、検討を行った。以上の3トンネルでの継続した計測結果をまとめると、以下の結論が導出できると考えられる。

- ひびわれの挙動を計測した結果、ひびわれ幅は覆工内温度や坑内温湿度等の変化の影響を受ける結果が得られた。そのため、ひびわれを評価する際は点検を実施する時期や季節に留意する必要がある。
- 覆工打設後5～6年以降の乾燥収縮に起因すると考えられるひびわれのひびわれ密度は横ばいまたは増加する場合でもわずかである傾向が見られた。ただし、今後もデータを収集し分析を行う必要がある。
- 覆工応力は、トンネルごとに程度の差はあるが、圧縮側の値を示し、覆工内温度や坑内温湿度等の変化に影響される結果が得られた。これは、覆工コンクリートは坑内環境の変化を通して膨張と収縮が長期的に継続しているためと考えられる。

以上のように、トンネルの覆工コンクリートの長期的な挙動について、経時変化によるひびわれの進展の傾向、覆工内温度や坑内温湿度等の坑内環境による影響を把握することができた。しかし、トンネルごとに得られる結果のばらつきが大きい部分もあり、本計測結果のみでは判断することが難しい部分もある。そのため、さらにデータを収集し検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.11
- 2) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，2014.6
- 3) 真下英人，砂金伸治，木谷努，遠藤拓雄：繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工のひびわれに関する研究報告書，土木研究所資料，第4000号，2006.3
- 4) 真下英人，砂金伸治，木谷努，遠藤拓雄：トンネル覆工の収縮ひびわれに関する研究，トンネル工学論文集，第15巻，pp1-11，2005.12
- 5) 真下英人，角湯克典，森本智：トンネル覆工のひびわれの進展に関する一考察，土木学会第62回年次学術講演会，62巻，pp3-149，2007.9

(2014.9.15 受付)

CONSIDERATION ABOUT THE BEHAVIOR OF THE TUNNEL LINING BASED ON A LONG-TERM MEASUREMENT RESULT

Toshiyuki SASADA, Nobuharu ISAGO and Toshiaki ISHIMURA

The maintenance through the visual inspection and hammering test appropriately is required for a road tunnel. Near-by visual inspection and hammering test to lining concrete is done, and the state of the tunnel is grasped. In addition, deformation in the lining concrete is measured. However, the part that the mechanism such as long-term behavior of crack hasn't been investigated in detail is left.

Therefore we collected data of concrete crack to know the mechanism such as long-term behavior of crack of the lining concrete.

The result shows that crack width and lining stress are affected by the change of temperature in lining concrete and temperature-humidity in tunnel. And after 5 to 6 years from the completion of construction, the crack density per unit area is almost same or slightly increases.