

トンネル覆工の収縮ひび割れに関する研究

Research on shrinkage crack of concrete on tunnel lining

真下 英人¹・砂金 伸治²・木谷 努²・遠藤 拓雄³

Hideto Mashimo, Nobuharu Isago, Tsutomu Kitani and Takuo Endou

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

²正会員 修士(工学) 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:isago@pwri.go.jp

³正会員 国土交通省北海道開発局札幌開発建設部 (〒073-0033 滝川市新町2-1-31)

Laboratory experiments were carried out to clarify the mechanism of crack on tunnel lining using the specimens with plain concrete and steel fiber reinforced concrete considering the length and mixture ratio of fiber. Steel fiber reinforcement was expected to slack the occurrence and the development of crack by shrinkage and to restrain the strain from the results of experiment. Field measurements and observation as for tunnel lining with SFRC were also done in two tunnels. The behaviors of tunnel lining such as stress and width of crack were grasped with time and the effect of reinforcement by SFRC was also found in terms of the occurrence and the width of cracks on site.

Key Words : tunnel, crack, permanent lining, shrinkage, steel fiber reinforced concrete

1. はじめに

道路トンネルの覆工には、供用性、施工中または施工後の不確定な要素に対する安全率の向上、また、外力を支持させる等といった多岐に渡る役割が期待されている。筆者らは実大規模の載荷実験および数値解析を通じ、特に鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)をトンネル覆工に採用した場合の力学的特性の向上に関する検討を行い、その効果を明らかにしてきた^{1)~2)}。しかし、近年では必ずしも外力による影響とは考えにくい覆工コンクリートの剥離・剥落といった現象が多く発生してきており、合理的で経済的な覆工設計法を確立するためには、力学的特性以外の点についても検討を行う必要があると言える。すなわち、耐力力の向上を図ると同時に、繊維補強コンクリートを覆工に用いた場合の長期の耐久性向上に関する効果を把握する必要がある。これらを同時に解決することにより、一層適切な覆工構造の提案が可能となると言える。

覆工コンクリートの耐久性の向上を考える場合は覆工に生じる変状、特に覆工に発生するひび割れに関する検討が重要な項目の一つであると言える。ひ

び割れの発生による要因も多岐に渡るが³⁾、外力の影響によらないものを考える場合、代表的なものとしてコンクリートの硬化温度による温度収縮やトンネル内の温度・湿度の変化による乾燥収縮(以下、温度・乾燥収縮)による収縮ひずみの発生に伴うひび割れの検討が必要であると考えられる⁴⁾。これまでに、コンクリートの収縮ひび割れに関してはコンクリート内部の水分の状態による影響⁵⁾や構造物の拘束状態の影響⁶⁾があることが示されている。また、トンネル覆工を想定した供試体を用いた収縮ひび割れに関する実験結果によると、覆工背面の拘束による影響があることが示されている⁷⁾。一方で、繊維補強コンクリートに関して、例えば、樹脂繊維による短繊維補強コンクリートのひび割れの効果を室内模型実験にて検討し、繊維の混入が初期ひび割れの発生の抑止につながる可能性があることが明らかにされている⁸⁾。しかし、これらの既往の知見は、実際のトンネル覆工に用いられるコンクリートの諸元・寸法等に完全に合致させて検討したとはいえず、配合に関しても限られた条件における検討にとどまっている。また、実験結果が実構造物による観察・計測結果等と比較されていないものが多い。長

期の耐久性の向上を図ったトンネル覆工構造の設計法を提案するためには、実際のトンネル覆工の配合を模擬した場合の温度・乾燥収縮によるひび割れに対する検討を行う必要があり、また、実施工を通じて、用いられる覆工材料と温度・乾燥収縮によるひび割れの発生や進展との関連性を検証することが必要である。

本研究では、トンネル覆工に使用されているプレーンコンクリートやSFRCの温度・乾燥収縮に伴うひび割れのメカニズムの解明のために、実際の覆工コンクリートと同一の配合を用いた模型による室内要素実験を実施した。具体的には、トンネル覆工の温度・乾燥収縮過程で生じるひび割れの発生や進展を抑制する効果を期待し、SFRCの適用性を検討した。特に材料条件、すなわち鋼繊維の繊維長や混入率が覆工コンクリートの温度・乾燥収縮によるひび割れ発生に与える影響を把握するとともに、環境条件、すなわち、湿度条件や風速条件による影響についても併せて検討した。また、実際のトンネルの覆工コンクリートにSFRCを用いた試験施工を実施し、トンネル覆工の挙動を把握するとともに、温度・乾燥収縮によるひび割れの抑制や分散に対するSFRCの効果に関して検討を行った。

2. 温度・乾燥収縮ひび割れの抑制効果に関する室内要素実験

本章ではトンネル覆工に採用されているコンクリートを使用した供試体を用いて、主として温度・乾燥収縮により発生するひび割れの挙動を把握するための実験に関して述べる。

(1) 室内要素実験の概要

室内要素実験はプレーンコンクリートとSFRCに対して、温度・乾燥収縮によるひび割れの発生および発生後の挙動を検討することを目的として行った。表-1に実験で用いたコンクリートの配合を示す。配合(A)は既存のトンネル覆工コンクリートのうち、プレーンコンクリートを用いる場合に採用される配合である。また、配合(B)はSFRCをトンネル覆工に用いる場合の配合を念頭に置いたもので、鋼繊維長が60mm、混入率が0.5%の場合の配合を参考とし、温度・乾燥収縮のひび割れに関して基礎的な挙動を実験により検討するために、水セメント比を配合(A)と同一にしたものである。また、SFRCの特性を検討するために、鋼繊維長や混入率を変化させた実験についても実施した。その場合については、繊維によ

表-1 室内要素実験のコンクリート配合

配合	A	B
設計基準強度(N/mm ²)	18	18
ベース時のスラブ (cm)	12	15
空気量(%)	4.5	4.5
粗骨材の最大寸法 Gmax(mm)	20	20
水セメント比(%)	55.0	55.0
単位水量(kg/m ³)	161	169
セメント量(kg/m ³)	293	308
混和剤(AE減水剤) (kg/m ³)	3.14	3.30

表-2 室内要素実験ケース一覧

ケース	配合	コンクリートの種類	温度条件	湿度条件	風速条件
1-a/b	A	プレーン	20℃	40%	無風
2-a/b	B	プレーン(ベース)	20℃	40%	無風
3-a/b	B	SF(60mm, 1.0%)	20℃	40%	無風
4-a/b	B	SF(60mm, 0.5%)	20℃	40%	無風
5-a/b	B	SF(60mm, 0.3%)	20℃	40%	無風
6-a/b	B	SF(30mm, 0.5%)	20℃	40%	無風
7-a/b	B	SF(30mm, 0.3%)	20℃	40%	無風
1-h	A	プレーン	20℃	60%	無風
4-h	B	SF(60mm, 0.5%)	20℃	60%	無風
1-n	A	プレーン	20℃	40%	無風
1-w	A	プレーン	20℃	40%	風速2m/s
2-n	B	プレーン(ベース)	20℃	40%	無風
2-w	B	プレーン(ベース)	20℃	40%	風速2m/s

る影響を検討するという目的から、母材コンクリートの配合は全てのケースで配合(B)と同一として実験を実施した。また、母材コンクリートによる影響を把握するために、配合(B)でプレーンコンクリートとした場合の実験(以下、ベースと称する)も併せて実施した。なお、表-1中に示したスラブはプレーンコンクリートにおける状態、すなわち、鋼繊維を混入する場合は混入前でのベースコンクリートのスラブを指しており、特に配合(B)で鋼繊維を混入した後のスラブは15cm未満となっていた。

表-2に実験ケースの一覧を示す。実験は、主として3つのシリーズに分けて実施した。第1のシリーズは、恒温恒湿室にて一定温度(20℃)、一定湿度(40%)の条件において、配合(A)と配合(B)のプレーンコンクリート、および配合(B)として鋼繊維の長さや混入率を変えた7種類のケースにて実験を実施した。なお、同一の配合にて2つの供試体を作成して実験を行い、それらをa～bと称する。第2のシリーズは、供試体数が1体で、配合についても2種類と限られてはいるが、温度は第1のシリーズと同様の20℃とし、湿度を60%に変化させた場合について実

験を実施した。これらをケース1-hと4-hと称する。さらに、第3のシリーズとして、トンネル坑内に吹く風の影響のみを考慮するため、温度や湿度は基本のケースと同一であるが、ケース1-wおよび2-wとして、供試体に2m/sの一定風を常時あてた場合のケースについても実験を行った。この場合にはケース1-aや1-b、または2-aと2-bと同一の配合である供試体を作成して実験を行い、無風の条件としてケース1-nおよび2-nとした。

本実験では、JIS原案⁹⁾に準拠し、ひび割れを強制的に発生させるために用いる拘束供試体を作成して実験を実施した。図-1に実験に用いた拘束供試体を示す。これは、剛と見なせる鋼製型枠にコンクリートを打設し、両端部をジベルによりコンクリートを拘束できる構造を備えたものである。コンクリート中央部には凹部を作り、両端の拘束に伴い、コンクリートが収縮することにより凹部でひび割れが発生しやすくなっている。コンクリート供試体には凹部中央とその上下の3箇所、および型枠の2箇所合計5箇所にひずみゲージを貼付し、供試体に発生する収縮に伴うひずみの経時変化を測定した。コンクリートを打設後、供試体の表面と凹部の側面部分からのみ型枠を取り外し、ひずみゲージの貼付が可能となる材齢3日でゲージを貼付して、ひずみの測定を開始した。写真-1に実験における拘束供試体の設置状況の例を示す。

実験の観察・計測項目は、貼付したひずみゲージによる供試体に発生するひずみに加え、目視観察およびひずみの計測結果より判断したひび割れ発生までの材齢、およびクラックゲージによる発生したひび割れの幅である。それ以外に、拘束供試体と同一の環境下に存置した管理供試体を用いて、第1および第2のシリーズに関しては一軸圧縮強度およびヤング率、第3のシリーズに関しては一軸圧縮強度を測定した。

なお、本実験では写真-1に示すようにトンネル覆工が実際に置かれている形状や拘束条件、例えば、覆工がアーチ型の形状をしていることや、覆工の背面に防水シート、支保工等が存在することを再現することは出来ない。このことから本実験は、コンクリートの配合や混入材料そのものの影響や環境の影響を検討するものであり、本実験結果で得られたひび割れ発生材齢や供試体に生じるひずみの絶対量が、実際のトンネルにおけるひび割れ発生材齢やひずみとは必ずしも一致しない可能性が高いことに注意を要する。

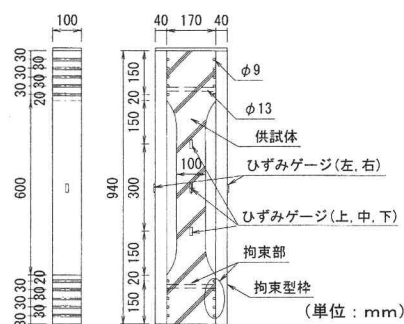


図-1 拘束供試体の概要図

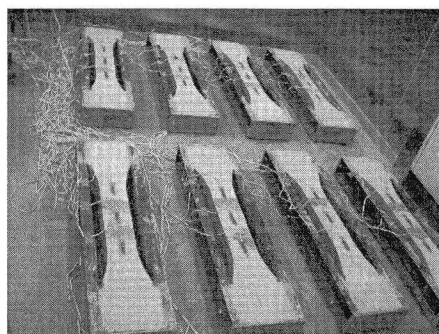


写真-1 拘束供試体の設置状況の例

表-3 実験供試体の材料定数とひび割れ発生材齢

ケース	配合	コンクリートの種類	一軸圧縮強度 (N/mm ²) (材齢28日)	ヤング率 (N/mm ²) (材齢28日)	ひび割れ発生材齢 (日)
1-a/b	A	ブレン	24.9	18958.7	23/26
2-a/b	B	ブレン(ベース)	22.8	18048.0	15/13
3-a/b	B	SF(60mm, 1.0%)	26.4	17491.3	16/19
4-a/b	B	SF(60mm, 0.5%)	29.9	20636.0	23/28
5-a/b	B	SF(60mm, 0.3%)	30.7	21450.3	27/41
6-a/b	B	SF(30mm, 0.5%)	26.0	19426.0	30/30
7-a/b	B	SF(30mm, 0.3%)	26.7	20059.3	22/18
1-h	A	ブレン	24.8	19918.3	なし
4-h	B	SF(60mm, 0.5%)	23.0	18059.0	53
1-n	A	ブレン	21.7	-	22
1-w	A	ブレン	20.6	-	21
2-n	B	ブレン(ベース)	23.8	-	15
2-w	B	ブレン(ベース)	21.7	-	17

(2) 実験結果

a) ひび割れ発生材齢

表-3に各ケースにおけるひび割れの発生材齢と材齢28日における一軸圧縮強度とヤング率を示す。第1のシリーズでは同一の供試体を2体作成したが、一軸圧縮強度やヤング率は材齢28日の1回のみの測定とした。これより、各シリーズ毎で考えた場合、ケース毎での一軸圧縮強度やヤング率の顕著な差は認められないと考えられる。

写真-2にひび割れ写真の一例として、ケース6-a

の拘束供試体におけるひび割れの発生状況を示す。なお、ひび割れの発生箇所を分かりやすくするために、ひび割れ発生近傍に強調のためのマーカーが付されている。ひび割れはすべてのケースにおいて拘束供試体の輪切り状に1箇所だけ発生した。

図-2に第1のシリーズであるケース1～7，すなわち温度が20℃，湿度が40%，および無風である条件におけるひび割れが発生した時点でのコンクリートの材齢を同一のケースでまとめたものを示す。プレーンコンクリートであるケース1の配合(A)とケース2の配合(B)を比較すると，配合(A)の方がひび割れ発生材齢が平均して大きい，すなわち配合(B)よりもひび割れの発生が遅いことが分かる。配合(A)と配合(B)とは同一の水セメント比ではあるものの，配合(A)のほうが単位水量やセメント量が少なく，コンクリートの収縮の度合いが小さいためと考えられる。

また，ケース2の配合(B)のベースコンクリートとケース3～7の鋼繊維補強の各ケースを大まかに比較すると，母材の配合が同一であるにもかかわらず，鋼繊維を混入した各ケースの方がひび割れ発生材齢が概して大きいことが分かる。これより，鋼繊維にはひび割れの発生を遅延させる効果があることが認められる。SFRCを用いたケースのうち，ケース4～7について比較すると，繊維長が60mmの場合は混入率の小さい方がひび割れ発生材齢が若干ではあるが大きい結果が得られたものの，繊維長が30mmの場合は混入率の大きい方がひび割れ発生材齢が大きい結果が得られた。

なお，繊維長が60mmで混入率が1.0%のケース3のひび割れの発生材齢が小さくなった原因は，打込み時点でスランブが2～3cm程度となるなど，スランブロスが極めて大きく，拘束供試体の品質の確保が非常に困難であったことが考えられる。本実験では覆工コンクリートの基礎的な挙動を把握するために，SFRCの諸ケースに対して母材コンクリートの条件を同一とし，スランブはベースコンクリートの時点で固定されている。しかし，実際の覆工コンクリートの施工においては，混入する繊維の混入率等の特性に応じて母材コンクリートの配合を変更し，覆工コンクリートの品質を極度に低下させずに施工性に留意して打設することが一般的である。

以上の結果を総合して考えると，室内要素試験レベルでは繊維の混入により発生材齢は異なるが，実験で実施した範囲内での繊維長や混入率の差がひび割れ発生材齢に与える影響は顕著であるとは言い難いことが分かる。

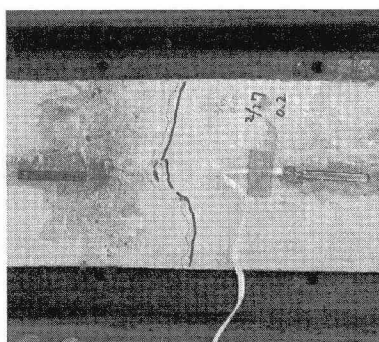


写真-2 ひび割れの発生状況の例(ケース6-a)

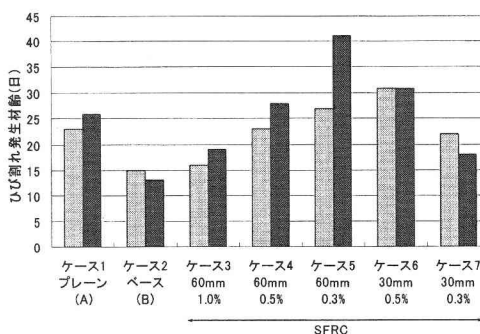


図-2 ひび割れ発生時の材齢(ケース1～7)

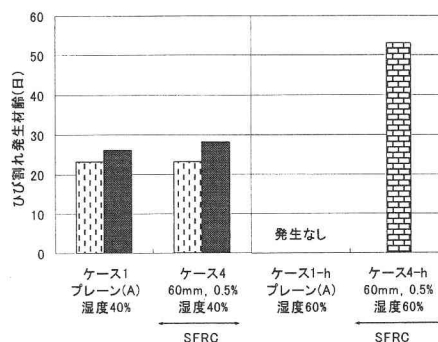


図-3 ひび割れ発生材齢に対する湿度の影響

次に，第2のシリーズの検討結果として，図-3に湿度を変化させた場合のひび割れ発生材齢について示す。湿度を60%とした場合，ケース1-hではひび割れが発生せず，またケース4-hでは，湿度が40%の場合に比較してひび割れの発生までの材齢がかなり大きいことが分かる。このことは，温度・乾燥収縮のひび割れに関しては湿度の影響が非常に大きく，養生時に湿潤状態が保たれていれば，初期のひび割れの発生を抑制できる可能性が高いことを示している。

さらに、第3のシリーズの検討結果として、風の有無を考慮した場合、ケース1-wでは材齢21日、ケース2-wでは材齢17日でひび割れが発生した。この結果を無風の状態と比較すれば、風の有無がひび割れの発生に及ぼす影響は小さいことが推察される。

以上より、一般的な傾向として考えれば、鋼繊維を混入することで、ひび割れの発生材齢が大きくなるということができ、ひび割れの発生を遅延させる効果が期待できるものと考えられる。また、湿度による影響は大きいものの、風による影響は小さいと考えられる。

b) 拘束供試体のひずみの変化

拘束供試体のコンクリート部分と型枠部分に貼付したひずみゲージによりひずみの変化を測定した。図-4および図-5に例としてケース1-bとケース4-aのひずみの変化を示す。なお、凡例中に示してある上・中・下がコンクリート供試体に発生するひずみであり、型枠左・型枠右がそれぞれ鋼製型枠に発生するひずみで、位置はそれぞれ図-1の表記と対応する。

すべてのケースの1つ1つのひずみの絶対量を取り上げて定量的に議論することは困難であるが、全体的な傾向として、計測を開始してからある時点までは、供試体・鋼製型枠とも圧縮ひずみが発生する。これはコンクリートが収縮する方向へ変形しようとするため、見かけ上、供試体は圧縮の変形を生じるためであると考えられる。その際、コンクリートに追従する形で鋼製型枠にも圧縮ひずみが発生する。その後、ある材齢に達した時点で、ひずみに不連続な変化を示す点がある。この時点で供試体の圧縮ひずみが急激に増大し、逆に、鋼製型枠は引張ひずみに転じる。このひずみの不連続点は供試体にひび割れが発生した瞬間であり、目視観察によるひび割れ発生材齢と一致する。この圧縮ひずみが急激に増大する現象は、供試体が鋼製型枠による固定で抑制されていた収縮に伴う圧縮ひずみが、ひび割れの発生によって変形が急激に解放され、見かけ上の供試体の圧縮がさらに進展するためのものであると考えられる。また、鋼製型枠については、供試体にひび割れが生じることでひずみが解放され、初期の状態、すなわち変形が0の状態に戻ると考えられるが、ひび割れ発生以降では鋼製型枠には若干の引張ひずみが生じている。これは、コンクリートの打設から表面および凹部側面の型枠の取り外しおよびひずみの測定開始までの間に供試体に発生した圧縮ひずみの絶対量と見なせる値であると考えられる。

図-4より、ケース1-bの配合(A)のプレーンコンク

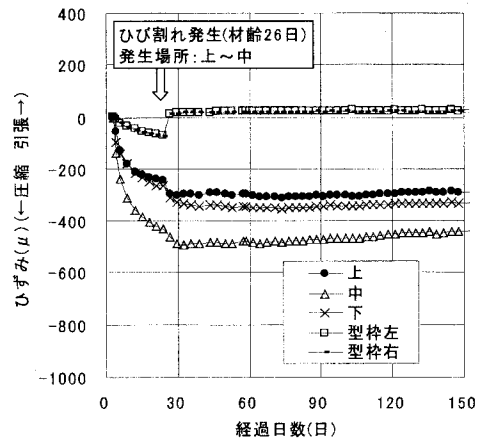


図-4 拘束供試体のひずみの変化(ケース1-b)

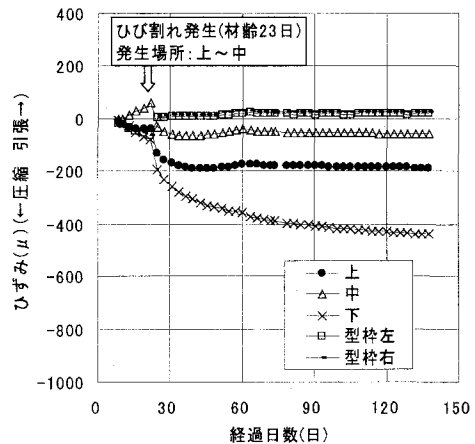


図-5 拘束供試体のひずみの変化(ケース4-a)

リートに関しては、概ね300～450 μ 、図-5より、ケース4-aの繊維長が60mm、混入率が0.5%のSFRCに関しては、50～450 μ 程度の収縮に関係するひずみが発生している。これらのケースでは供試体に貼付した3箇所のひずみが異なっているが、この傾向は他のケースにも共通していた。鋼製型枠に生じた引張ひずみについては、各ケースを通じて数十 μ にとどまっており、ばらつきが大きいとは言えず、実験上の問題が生じていることは想定しにくい。このことから、コンクリート供試体のひずみのばらつきは、乾燥等に伴って供試体が収縮するときに、例えば粗骨材や繊維等の存在が変形に対して局所的な影響を及ぼしていることなどが想定される。また、今回の実験では各ケースを通じてひび割れの発生場所とひずみゲージの貼付位置との関連性については見受けられなかったが、ひび割れの発生位置によっては、

ひずみの変化の傾向にも影響を及ぼす可能性があることなども考えられる。このことから、今後の考察については収縮ひずみは、それぞれのコンクリート供試体に発生したひずみ(上・中・下の3箇所)の平均値で取り扱うこととした。

図-6に各ケース毎の2つの拘束供試体に発生する配合毎の平均収縮ひずみを示す。ひずみは材齢10日目、ひび割れが発生する直前、さらに、ひずみが概ね収束していると考えられる試験終了時の最終値のそれぞれの値を記した。これより、材齢10日目の値を比較すると、配合(A)であるケース1では若干ひずみが高い傾向があったが、母材コンクリートの配合が同一であるケース2~7についてはひずみは概ね同一の値を取っている。また、ひび割れ発生直前の値を比較しても、ケース4で若干ひずみが小さい傾向があったものの、配合が同一であれば、概ね同様のひずみであったということが出来る。さらに、最終値を比較すると、ケース4~5の繊維長が長い60mmの場合が発生しているひずみは、繊維を混入していないケース2やケース6~7の繊維長が短い30mmの場合よりも小さい場合が多いことが分かる。また、繊維の混入率について考えてみると、ケース3を除いて混入率が高い方が発生しているひずみは小さい傾向があった。

以上より、ベースコンクリートが配合(B)と同一であるケース2~7を比較すると、ひび割れが発生する前のひずみはほぼ同一と考えられるが、鋼繊維を混入することでひび割れが発生した後のひずみは低下し、スランプロスが大きかったケース3を除けば、鋼繊維の混入率が高いほど、または繊維長が長いほどひずみは小さくなることが分かる。したがって、SFRCを採用した場合、ひび割れが発生した後において、供試体全体のひずみの増加が抑制されており、ひび割れの進展が抑制されているための効果が現れているものと言えることが出来る。

3. 鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工の現地試験施工

前章では室内要素実験により、主として覆工に用いられるコンクリートの材料条件および環境条件が、温度・乾燥収縮に与える影響について検討した。本章では、覆工コンクリートが置かれている施工条件、環境条件、境界条件等が同一である下で、トンネル覆工コンクリートにSFRCを採用した場合の、ひび割れ幅やひび割れ発生日数に与える影響を検討するための試験施工を実施した。試験施工では、覆工にプ

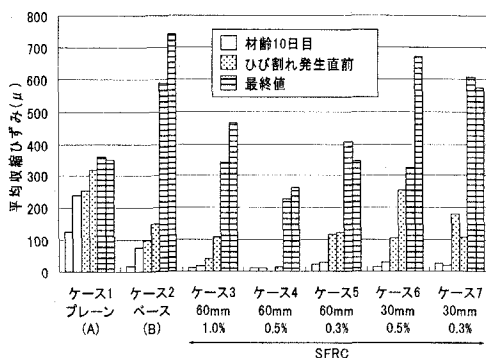


図-6 平均収縮ひずみの変化(ケース1~7)

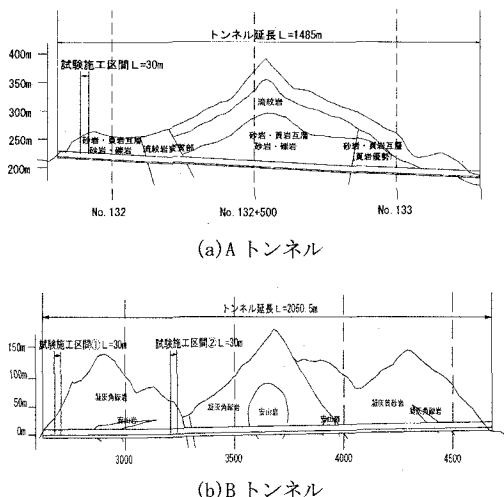


図-7 試験施工トンネルの概要と試験位置図

レーンコンクリートを打設した区間とSFRCを打設した区間のひび割れ状況や日数を比較した。また、覆工の挙動に関する基礎的なデータを収集し、ひび割れとの関連について検討を加えた。

(1) 現地試験施工の概要

試験施工は2つのトンネルで実施された。それぞれをAトンネルとBトンネルと称し、図-7(a)および(b)に各トンネルの地質縦断面図の概要を示す。

Aトンネルは延長が1485mで、試験施工部の岩種は主として中生代の砂岩頁岩互層より構成されており、近傍の同岩種における孔内水平載荷試験結果によれば、変形係数の平均値は2.30GPa、一軸圧縮強度の平均値は30MPaとなっていた。当該区間での支保パターンはDIパターンであり、防水シートと覆工コンクリートの間に厚さ7cmの吹付け断熱材が設置された。図-8にAトンネルにおける計測機器の配置図を

示す。坑口側から59.5～79.5mの位置でSFRCによる覆工を2スパン(延長20m)で打設した。また、この区間に隣接した79.5～89.5mの位置で施工された通常のブレンコンクリートを用いた覆工についても、比較のために計測および観察を行った。Aトンネルでは、覆工の打設は冬期である2月に行われ、その時点でトンネルは貫通していたが、トンネル内の保温のために両坑口には隔壁が設置されていた。覆工内面のひび割れ観察を打設後6ヶ月、9ヶ月、15ヶ月および20ヶ月、断面変位の計測は定期的を実施した。なお、21ヶ月後からはトンネルの供用が開始されたことから、ひび割れ観察と断面変位の計測は不可能となった。そのため、ひび割れが発生している代表的な3点にパイ型変位計を設置し、ひび割れ幅の計測を打設後38ヶ月まで継続して実施した。また、コンクリート有効応力計を用いることによる覆工応力、埋設型の温度計を用いることによる覆工内温度および坑内温度の計測に関しては覆工の打設開始より24時間の自動計測によりデータの収集を継続した。

Bトンネルは延長が2050.5mであり、試験施工は、坑口付近(区間①)、および坑口から600m付近(区間②)の2箇所で行われた。施工では、SFRCを打設する試験施工区間前後の区間においても試験施工区間と同様にひび割れの発生状況を観察した。なお、坑口付近および坑口から600m付近の区間ともに試験施工区間はDIパターンである。Aトンネルと同様に区間①では防水シートと覆工コンクリートの間に吹付け断熱材が設置されていた。Bトンネルでは、覆工の打設は区間①では冬期である12月に、区間②では翌年の8月に実施され、これらの時点ではトンネルは貫通していなかった。覆工内面のひび割れ観察に関しては区間①の打設後22ヶ月および25ヶ月(区間②においては、打設後14ヶ月および17ヶ月)に実施した。

表-4に各トンネルで採用されたコンクリートの配合および打設時の温度条件等を示す。なお、セメントはすべてのトンネルにおいて、高炉セメント(B種)を採用した。

(2) 現地試験施工の結果

a) ひび割れの観察結果

Aトンネルにおけるひび割れの観測結果を図-9に示す。なお、ひび割れが確認された場合は代表的な地点について、その幅についても記した。なお、図中の⊗印は21ヶ月後よりひび割れ幅の計測をパイ型変位計にて開始した点である。

打設後6ヶ月(8月)では、SFRCを覆工に用いた区間

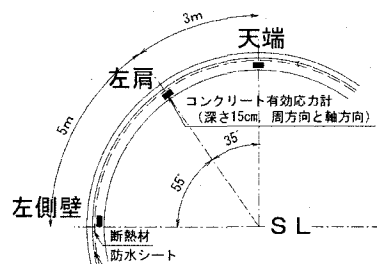


図-8 Aトンネルの計測機器配置図

表-4 試験施工トンネルにおけるコンクリート配合と打設時の条件

区間	Aトンネル		Bトンネル	
	SFRC	ブレン	SFRC	ブレン
設計基準強度(N/mm ²)	18	18	18	18
スラブ厚(cm) (ベース)	15 (19)	12	15 (20)	12
空気量(%)	3.8	4.5	4.5	4.5
粗骨材の最大寸法Gmax(mm)	25	40	20	40
水セメント比(%)	52.5	52.5	54	54
単位水量(kg/m ³)	175	148	173	164
セメント量(kg/m ³)	334	282	321	304
混和剤(AE減水剤)(kg/m ³)	3.34	0.75	2.09	0.76
鋼繊維長(mm)	60	—	50	—
鋼繊維混入率(%)	0.5	—	0.5	—
覆工の施工時期	平成13年2月		坑口付近(区間①): 平成13年12月 坑口から600m(区間②): 平成14年8月	
打設時の坑内気温	坑口部寄り10℃、山側部寄り11℃	10℃	区間①8℃ 区間②21℃	区間①8℃ 区間②21℃
練混ぜ温度	坑口部寄り12℃、山側部寄り15℃	13℃	区間①14℃ 区間②20℃	区間①14℃ 区間②22℃

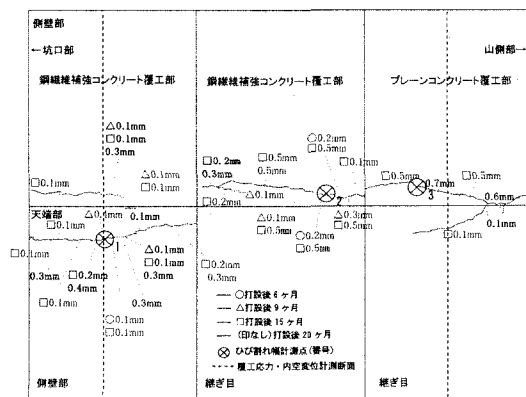


図-9 Aトンネルのひび割れ観察結果

で、わずかではあるがひび割れの発生が確認された。この時点ではブレンコンクリートを覆工に用いた区間ではひび割れの発生は確認されなかった。

打設後9ヶ月(11月)では、SFRCを覆工に用いた区間のひび割れが若干進展したり、新たな発生が見受けられた。この時点においてもプレーンコンクリートを覆工に用いた区間ではひび割れの発生は確認されなかった。

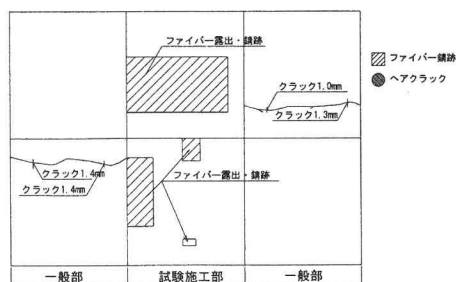
打設後15ヶ月(5月)では、プレーンコンクリートを使用した部分でもひび割れの発生が確認された。このことから、同一の養生条件・環境条件下において、SFRCの区間のほうがプレーンコンクリートの区間よりもひび割れが弱材令で発生していることになる。しかし、ひび割れ幅を計測したところ、プレーンコンクリートを用いた覆工のひび割れ幅は大部分で0.5mm程度であったのに対し、SFRCを用いた覆工では0.2~0.5mm程度以下にとどまっていた。これより、プレーンコンクリートと比較してSFRCを覆工に使用した場合は、ひび割れはより若材令で発生するが、その後のひび割れ幅の進展は小さい傾向にあることが分かった。若材令で発生した理由は、プレーンコンクリートよりもSFRCのベースコンクリートの方が単位水量が多いためと考えられ、これは室内実験から得られた結果と一致すると言える。

打設後20ヶ月(10月)では、最も坑口部に近い側のSFRCを打設した区間で若干のひび割れ幅の拡大が見られた。プレーンコンクリート部ではひび割れの進展も見られたが、SFRCを用いた区間では局所的なひび割れ幅の拡大にとどまり、新たなひび割れの進展は見受けられなかった。

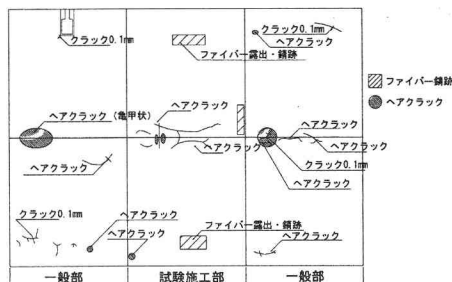
図-10にBトンネルにおけるひび割れの観察結果を示す。坑口付近の区間①ではプレーンコンクリートを用いた一般部で幅が1.0mmを越えるひび割れが発生したのに対し、SFRCを用いた試験施工区間ではひび割れの発生がなかった。また、坑口から600m付近の区間②では、区間①に比較して打設後の材齢が小さいが、プレーンコンクリートを用いた一般部が幅0.1mm程度のクラックや亀甲状のヘアクラックが発生したのに対し、SFRCを用いた試験施工区間は、天端部近くのヘアクラックのみの発生にとどまった。

以上より、両トンネルの観察結果から、覆工にひび割れが生じた場合、SFRCを用いることでひび割れの分散および進展を抑制する効果があることが分かった。ただし、初期ひび割れの発生に関しては、AトンネルではSFRCを用いた区間のほうが早く、Bトンネルでは逆の結果となったことから、初期ひび割れの抑制効果に関しては、配合も含めてさらなる検討が必要であると考えられる。

また、Aトンネルの試験施工対象区間においては、防水シートと覆工コンクリートの間に吹付けによる



(a) 区間①(坑口付近)



(b) 区間②(坑口から600m付近)

図-10 Bトンネルのひび割れ観察結果

断熱材が存在していた。この試験施工区間とは別にひび割れの目視点検を実施したところ、断熱材が存在しない区間においてもひび割れの発生が見受けられていた。加えて、Bトンネルの区間①についても同様の断熱材が存在していたが、断熱材の有無に関わらず、ひび割れが発生した部分と発生しなかった部分があった。以上より、ひび割れの発生に及ぼす断熱材の存在の影響は低いと考えられるが、トンネル全体で検討する場合は留意する必要があると考えられる。

b) Aトンネルにおける覆工の挙動に関する計測結果

図-11および図-12にAトンネルにおけるSFRCを覆工に打設した区間、およびプレーンコンクリートを覆工に打設した区間での覆工応力および覆工内温度の計測結果を示す。計測は天端部、左右の肩部および左右の側壁部にて実施したが、代表的な計測結果として、応力については、天端部、左肩部および左側壁部、温度については天端部の計測結果を示した。応力に関してはほぼ左右対称、温度に関しては全点でほぼ同一の値である結果が得られていた。これより、軸方向・周方向の応力ともに、応力計が設置されている地点で概ね2N/mm²程度であり、ひずみは概ね100μ程度であった。このひずみは、場合によってはひび割れ等が生じるひずみであると言うことができ、例えば、図-5に示した室内要素実験でひずみ

が発生する場合の値と比較的一致していると言うことが出来る。また、同一の季節・温度で比較すると、わずかではあるが、時間の経過とともに応力が増加していることが分かる。加えて、図-11および図-12を比較すると、覆工にSFRCとプレーンコンクリートを打設した場合において、応力に関する顕著な差は現れていないことが明らかである。

図-13(a)および(b)に同区間における覆工打設後の断面の変位計測結果を示す。これらの図より、覆工打設直後は変位が増加しているが、時間の経過とともに変位の変動は非常に小さいことが分かる。なお、両断面における覆工打設前の変位計測結果によれば、天端沈下・内空変位ともに断面が縮小する方向に対して14~15mm程度であり、覆工打設前に完全に収束し、変位の増加はなかったことが確認されている。

図-14にパイ型変位計によるひび割れ幅の計測結果とトンネル天端部の坑内温度の経時変化を示す。凡例の数字や測点1~3の表記は図-9に対応している。ひび割れ幅に関しては、パイ型変位計の取り付け時を0としてある。この結果より、ひび割れ幅は季節の変動が大きく、同一のひび割れの箇所であっても、幅が大きく増減している。変位計設置後のひび割れ幅の増加量は、例えば経過月数が24~27ヶ月および36~38ヶ月付近といった冬期~春期では大きく、30~33ヶ月付近といった夏期~秋期では小さいことが分かる。図-9に示したひび割れの観察結果にこの傾向を当てはめれば、打設後6ヶ月、9ヶ月および20ヶ月はひび割れ幅が小さく評価される季節であり、15ヶ月は大きく評価される季節であることになる。そのため、15ヶ月後に観察した結果と20ヶ月後に観察した結果ではひび割れ幅の変化が小さい結果が得られたが、気温の変動による影響が含まれているものと考えられる。また、測定を行った3点とも同一のひび割れ幅の変化の傾向をとり、ひび割れ幅の最大値と最小値の差は、プレーンコンクリートよりもSFRCの方が小さいことから、ひび割れが発生した場合でも、その幅の抑制が鋼繊維により図られていると言うことができる。

以上のように、覆工の応力、断面の変位およびひび割れ幅の経時変化を考えると、本計測期間中に地山から外力が作用したとは考えにくく、温度変化等に起因した応力やひび割れ幅の変化の傾向が見て取れる。ただし、24ヶ月後と36ヶ月後では坑内温度の低下はほぼ同程度までに達していると考えられるが、ひび割れ幅については36ヶ月後の値が24ヶ月後の値よりも若干増加している。また、覆工応力について

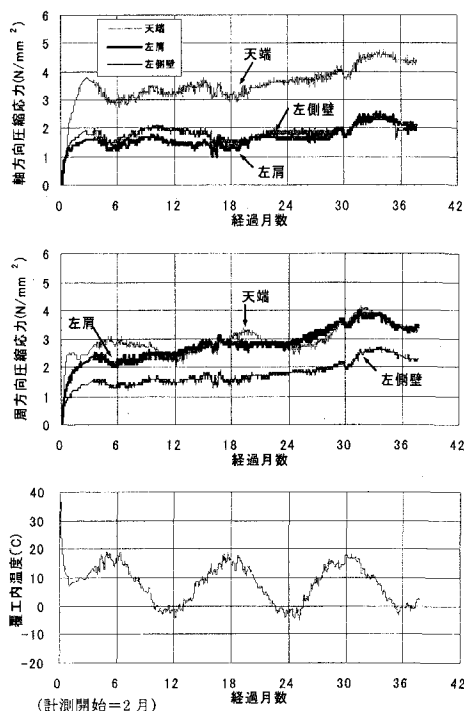


図-11 覆工応力・覆工内温度計測結果
(SFRC打設区間)

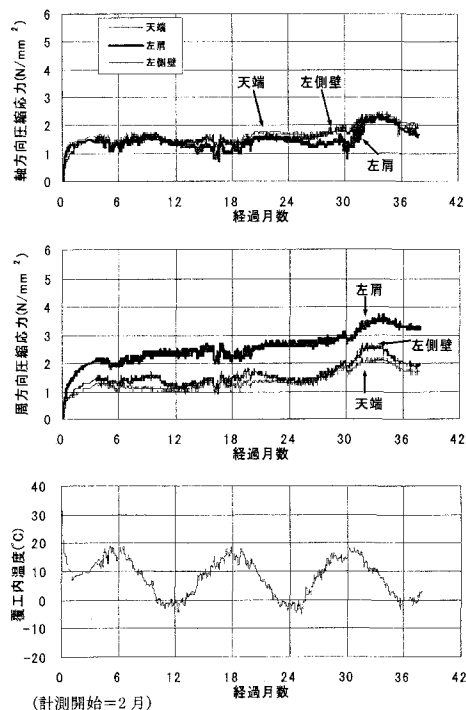


図-12 覆工応力・覆工内温度計測結果
(プレーンコンクリート打設区間)

も同時期で比較すると、若干ではあるがその値が増加していることが分かる。このような、より長期に渡る応力や温度の経時変化、およびひび割れの状況等に関しては、さらにデータの蓄積を図る必要があると考えられる。

4. 本研究の結論と今後の課題

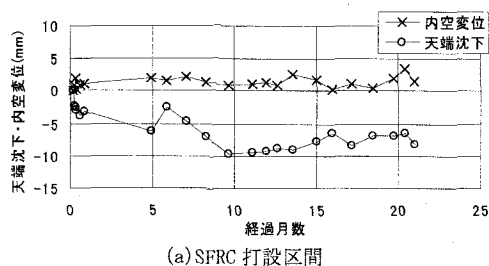
本研究では、実際に覆工に用いられているコンクリートと同一の配合を用いた模型による室内要素実験を実施し、SFRCを用いた場合のひび割れのメカニズムについて検討した。その結果、以下のことが分かった。

- ・ プレーンコンクリートに関して、同一の水セメント比である場合、単位水量がより小さい供試体の方が収縮の度合いが小さく、ひび割れ発生材齢が平均して大きくなった。
- ・ SFRCに関して、ひび割れの発生を完全に抑止する効果は鋼繊維には期待できないが、同一のコンクリートを用いる場合は、ひび割れの発生を遅延させる効果は認められた。
- ・ 鋼繊維の混入により、ひび割れ発生後にコンクリートに発生するひずみが低下し、ひび割れ開口の進展の抑制に伴い、供試体全体の変形も抑制されることが分かった。また、繊維の混入率が大きい、または繊維長が長いほど、発生するひずみは小さくなることが分かった。
- ・ ひび割れの発生に対して、湿度による影響は認められたが、風の有無による影響は認められなかった。このことは、適切な湿潤状態を保つことで、ひび割れの発生はある程度抑制されることを示している。

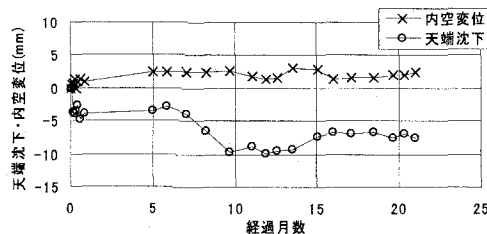
また、実際のトンネルの覆工コンクリートにSFRCを用いた試験施工を実施し、トンネル覆工の長期に渡る挙動を把握し、SFRCの温度・乾燥収縮によるひび割れの抑制や分散の効果に関して検討を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

- ・ 実際の施工より、SFRCを採用した場合、ひび割れの分散効果や、ひび割れ幅の開口の抑制効果が確認された。ただし、ベースコンクリートの性状によっては、SFRCを採用しても、ひび割れの発生材齢は改善されない場合があることが分かった。

以上のように、SFRCを採用することにより、トンネル覆工のひび割れの進展やひび割れ幅の抑制等が可能で、ひいては長期の耐久性の向上につながる可

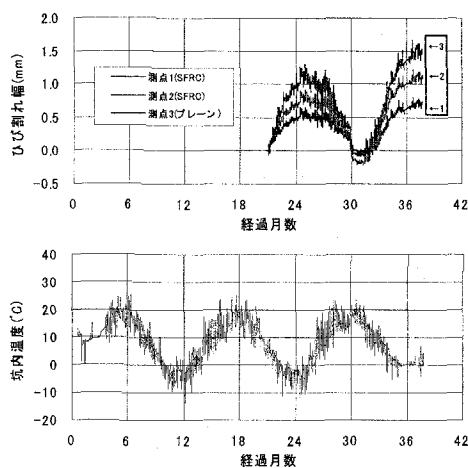


(a)SFRC 打設区間



(b)プレーンコンクリート打設区間

図-13 覆工打設後の変位計測結果



(計測開始=2月)

図-14 ひび割れ幅・坑内温度計測結果

能性が高いことが分かったが、室内要素実験の結果や実際のトンネルの施工結果の分析を踏まえても、その効果に多少のばらつきがあることが分かる。今後も、ひび割れの発生等に影響を及ぼす可能性の高いと考えられる環境条件を考慮しつつ、データの蓄積を図り、覆工の長期の耐久性に関して検討を続ける必要がある。

参考文献

- 1) 砂金伸治, 真下英人: トンネル覆工の耐荷力の評価に関する研究, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集,

- 第12巻, pp. 401-406, 2002.
- 2) 真下英人, 砂金伸治, 木谷努, 遠藤拓雄: 数値解析によるトンネル覆工の耐力に関する研究, 土木学会トンネル工学報告集, 第14巻, pp. 279-286, 2004.
 - 3) 道路トンネル維持管理便覧, 日本道路協会, pp.19-58, 1993.
 - 4) 土木学会: トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説, pp. 95-96, 1996.
 - 5) 大野俊夫, 魚本健人: 乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす水分分布の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp. 649-654, 2000.
 - 6) 鈴木計夫, 大野義照, 三浦義礼: コンクリートの一軸拘束ひび割れ試験と壁試験体の収縮拘束ひび割れ性状, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp. 261-266, 1988.
 - 7) 馬場弘二, 伊藤哲男: 覆工コンクリートの収縮ひび割れ抑制に関する実験的検討, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, VI-7, pp. 13-14, 2003.
 - 8) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 広原寿竜: 短繊維補強コンクリートの強度特性と乾燥収縮ひび割れ, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp. 211-216, 2001.
 - 9) 土木学会: コンクリート標準示方書〔規準編〕: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験法 (JSTM C 8202-1999), pp. 344-348, 2002.