

トンネル支保に用いたSFRCの耐久性に関する研究

Study on Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete for Support of Tunnel

福井 勝則*・大久保 誠介*・高見 法侑**・岡田 武二***
Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO, Noriyuki TAKAMI and Takeji OKADA

For the purpose of investigating the durability of steel reinforced concrete(SFRC) for tunnel lining, SFRC shotcreted before 20 years was extracted from Garo mine, and various kinds of testing were conducted in this study.

- 1)For the steel fiber, rust had produced only the surface, and the inside was not rusting at all.
- 2)Concrete about 5mm from the surface had carbonated.
- 3)Uniaxial tension and compression tests were conducted by servo-controlled testing machine. The uniaxial tension and compression behavior of SFRC shotcreted before 20 years was qualitatively in agreement with the that of before 1 years.

1. はじめに

トンネルの支保工や法面の保護工などに、鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと呼ぶ）は広く用いられている。このような土木工事では長期にわたる耐久性が必要であり、SFRCにも数十年以上の耐久性が要求されている。

鉄筋コンクリートでは、高アルカリ性環境のため、通常鉄筋の表面に不動態皮膜が形成され鉄筋が錆びにくい。しかしながら、時間の経過とともにコンクリートが中性化し、鉄筋の皮膜が破壊され腐食が進行したり、環境によっては、鉄筋の錆による体積膨張で短い期間に鉄筋コンクリートが破損することが知られている¹⁾。SFRCはコンクリートに鋼繊維を混入したものであり、組成的に鉄筋コンクリートと同様であるため、経年的に腐食が進行する恐れがあるので、耐久性に関していくつかの報告がなされている。たとえば、小林ら²⁾は海岸でSFRCの暴露試験を行い、表層部を除いて鋼繊維はほとんど腐食しないこと、さらに鋼繊維コンクリートを用いた鉄筋コンクリートでは鉄筋の腐食は生じないと報告している。その理由は、鋼繊維の界面効果によって電場が不連続的となり、腐食電流の流束が妨げられるためであるとしている。黒井ら³⁾も室内試験を行い、鋼繊維を混入した鉄筋コンクリートの電食劣化の抑制機構を指摘している。

SFRCの歴史はまだ浅いため、海岸での暴露試験や室内試験などで腐食環境を促進させた試験の結果が主であり、実証的に数十年にわたる耐久性を調べた研究はきわめて少ないのが現状である。そこで本研究では、トンネルの支保工として、約20年前に施工された吹付SFRCを現地から採取し、吹付SFRCが経年的にどのように変化したかを調べることにした。

* 東京大学 工学系研究科地球システム工学専攻

** 鋼材倶楽部 スチールファイバ委員会

*** 清水建設㈱ 技術研究所

2. 吹付SFR Cの特徴⁴⁾ および施工場所

吹付SFR Cの施工は、1977年4月に日本セメント(株)上磯工場峯朗鉱山機械搬入坑道(北海道上磯郡上磯町字峯朗54)において行われた。施工場所は、坑口から454m～475mの間で施工長は21m、吹き付け厚は平均で10cm、吹き付けたSFR Cは約60m³であった。坑道は峯朗鉱山の石灰石鉱床の一部であり、若干軟弱化した箇所ではSFR Cの吹付施工が行われた。

セメントとしてN社製超早強セメント、細骨材として川砂(5mm以下、FM=2.53)を用い、急結剤はN S社製の粉末急結剤を用いた。配合を表1に示す。

使用した鋼繊維は四角ねじれ形のもので、断面は0.35mm×0.5mmで長さ20mmのものである。SFR Cは生コンプラントで製造し、生コン車によって現場まで搬送した後、連続圧送式の吹付機により吹き付けを行った。その際、10×10×40cmのパネルにも吹き付けを行い、いくつかの試験を行っている。当時の力学試験結果を簡単に述べると、材令28日の段階で、曲げ強度(JIS A 1106)は5～6MPa、圧縮強度(JIS A 1114)は40～60MPa、せん断強度は7～10MPaであった。また材令1年での中性化試験の結果は1～2mmであった。

坑道からの供試体の切り出しは、1995年7月31日から8月1日に行った。吹き付け施工後、約20年経過したことになる。供試体は、SFR Cの施工区間より任意に選んだ6カ所から、直径40cmおよび10cmのボーリングによって切り出した。図1にボーリングコアの採取状況を示す。図1からわかるように、ほとんど壁面から水は湧き出しておらず、若干湿っている程度である。付近の湧き水を採取し分析したところ、表2の結果となり、平均的な河川水に比べてCl⁻、SO₄²⁻が少なく、HCO₃⁻が多くなっている。これはCaCO₃が空気中の二酸化炭素と水によって溶解したためと考えられる。

試験体採取時に、坑内の温度および湿度を測定したところ、温度は11～14℃、湿度は80～95%であった。この時、坑外では温度24℃、湿度70%であった。坑内温度は夏場にも拘わらずかなり低いこと、坑口から500mほど離れていることから推定して、施工箇所の温度と湿度の年変化および日変化はさほどないと予想される。坑内の二酸化炭素の測定も行ったが、0.03%と外気とほぼ同じ組成であった。

3. SFR Cの経年変化

吹付後約20年経過したSFR Cの経年変化を調べることを目的として、鋼繊維の発錆状況の観察および、コンクリートの中性化試験を実施した。

3・1 鋼繊維の発錆状況

坑道壁面の写真を図2に示す。目視観察した結果、表面に露出している鋼繊維はすべて錆が発生していた。この壁面に露出

表1 コンクリートの配合

スランプ	6～10
水セメント比	47～50%
水	228～271 kg/m ³
細骨材	1305～1531 kg/m ³
鋼繊維混入率	0～2.0% (体積)

表2 水質調査結果

	湧き水	平均的な河川水
pH	7.7	—
CO ₃ ²⁻	0	—
HCO ₃ ⁻	140	31.0
Cl ⁻	1.4	5.8
SO ₄ ²⁻	5.7	10.6
NO ₃ ²⁻	3.9	—

pHを除き、単位はppm。

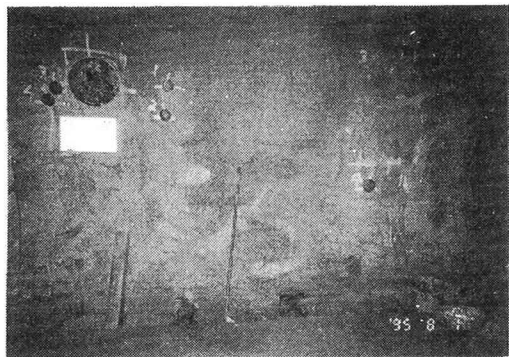


図1 ボーリングコアの採取状況

している鋼繊維のいくつかをコンクリートから引き抜いたところ、コンクリート中にあった部分は錆びていなかった。また、ボーリングで採取したコアの側面を観察した結果、錆びているのは壁面の極く近傍だけで内部の鋼繊維には全く錆が発生していないことが判明した。さらに、採取した円柱形供試体（直径 10cm）を吹き付け面に平行に 3cm ごとに輪切りにしたものを微粉碎し鋼繊維を採取した。こうして採取した鋼繊維を観察した結果、坑道壁面の鋼繊維以外は錆びていないことを再確認した。

3・2 中性化試験およびpHの測定

フェノールフタレイン法によりコンクリートの中性化深さを調べた。採取した円柱形供試体（直径 10cm）を圧裂引張試験で破壊させた後、破断面をはけで十分清掃し、フェノールフタレイン 1 %エタノール溶液を直接噴射して中性化深さを求めた。6カ所から採取したSFRCの中性化深さの測定結果を表3に示す。表では、No.3の供試体の中性化深さが最も深く、No.1、6の供試体が浅くなっている。原位置で20年を経過した供試体であるので、漏水の影響や微小亀裂の発生などの局所的な要因でこの程度のばらつきが生じたのではないかと考えられる。

参考文献⁵⁾に示されている普通コンクリートの中性化深さの推定式を用いて計算すると、20年で中性化深さは9mmとなった。測定した中性化深さの平均値は約5mmであり、推定値に比べて若干中性化深さが小さいが、普通コンクリートとの差異を明瞭に言うにはデータが不足ぎみである。

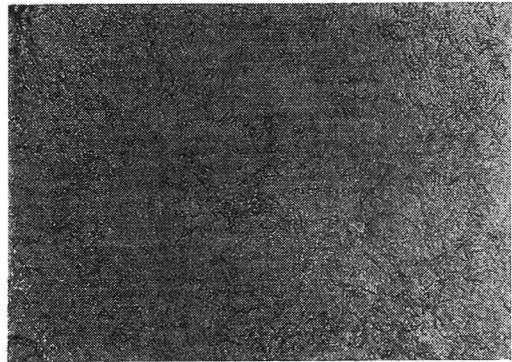


図2 坑道壁面の様子

表3 中性化深さの測定結果

	最大深さ	最小深さ	平均深さ
No.1	2.9	0.8	1.9
No.2	7.7	3.7	6.2
No.3	15.3	4.1	11.7
No.4	7.5	0.9	3.9
No.5	7.5	2.7	5.3
No.6	2.8	0.0	1.4

単位はmm。

表4 pH測定結果

坑道壁面からの距離 (cm)				
	0～3	3～6	6～9	9～12
No.2	12.0	—	—	—
No.3	11.9	12.2	12.1	—
No.4	12.1	12.4	12.3	12.2
No.5	12.3	12.3	12.3	—
No.6	12.3	—	—	—

次にJIS A 8802に基づいてコンクリートのpHの測定も行った。測定は坑道壁面から3cmごとにわけて実施し、その結果を表4に示す。pHは約12であり、このことからほとんど中性化していないことがわかる。

4. 力学試験

本章では、鋼繊維が混入していないプレーンコンクリートと、鋼繊維約1%のSFRCに対して、一軸引張試験ならびに一軸圧縮試験を実施し、吹付後20年経過した両者の力学特性を比較した結果について述べる。吹付SFRCの場合には、鋼繊維の配向により力学的特性に異方性が生じる。そこで図3に示すように吹き付け面と平行な方向（a方向）と、それに鉛直な方向（b方向）の2方向から試験体を作製した。供試体の寸法は直径3cm、高さ6cmの円柱形とし、同一条件で3本ずつの試験を行った。

4・1 一軸引張試験

試験は独自に開発した容量10kNのサーボ試験機により定歪速度制御（歪速度 $10^{-6} s^{-1}$ ）で行った。試験装置および試験方法の詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

応力-歪曲線を図4に示す。a方向の場合、鋼繊維の有無によらず一軸引張強度は4.5MPaである。強度破壊点以降、プレーンコンクリートは急激に応力が減少しているのに対して、SFRCでは徐々に応力が低下しており、鋼繊維の混入により延性化しているのがわかる。これは強度破

壊点でコンクリート部が破断した後も、鋼繊維（コンクリートからの鋼繊維の引き抜き抵抗）が荷重を支えるためである。一方、b方向の場合には、強度は 2MPa 程度と a 方向の半分以下となっている。これは既報⁶⁾でも述べたように吹き付けたコンクリートは吹き付け面と平行な層をなし、層間は比較的分離しやすいためである。ばらつきはかなり大きいb方向の場合にも、鋼繊維の混入により強度は変化しているとはいえない。強度破壊点以降ではSFRCの方が、若干延性的な傾向がうかがえるものの、a方向ほどは改善されていない。この理由として、鋼繊維はb方向では破断面と平行に配向しており、鋼繊維の引き抜き抵抗がほとんど作用しないためである。これらの事項は、著者ら⁶⁾が、吹き付け後、約1年程度経過したSFRCを実験した結果と定性的に一致しており、20年の経過後もその特性を保存していることがわかる。

2章で述べたように同じ配合のプレーンコンクリートに対して、材令 28 日で a 方向に破壊するように曲げ試験が行われて

おり、5~6MPa の曲げ強度（抗折力）が得られている。試験方法が異なるので、両者の定量的な評価は難しいが、曲げ強度が一軸引張強度より大きくなることを勘案すれば、劣化しているとは判断できない。

4・2 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験結果について述べる。試験は、MTS 社製の容量 150kN のサーボ試験機を使用して、定歪速度制御（歪速度 10^{-5} s^{-1} ）で行った。応力-歪み曲線を図 5 に示す。一軸圧縮強度は 50~60MPa であり、鋼繊維の有無や載荷方向によらずさほど変化していない。強度破壊点以降の特性は、鋼繊維の混入により延性的となるが、その傾向は a 方向に比べ、b 方向の方が大きい。これも既報⁷⁾で報告した吹付 SFRC の特性と一致している。すなわち、b 方向では載荷方向に対して鉛直な方向に配向しているため、破壊の進行に伴い供試体側面の肌落ちを鋼繊維が保持し、ある意味で側圧を作用させた時と同等の効果を発揮するので延性化する。一方、a 方向は載荷軸に対して平行に配向しているため、側面の肌落ちに対して鋼繊維が影響を及ぼさず、さほどプレ

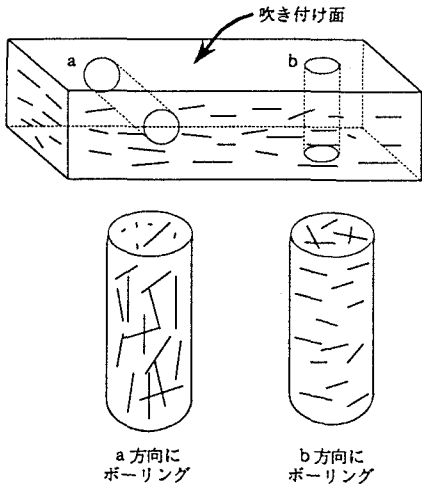
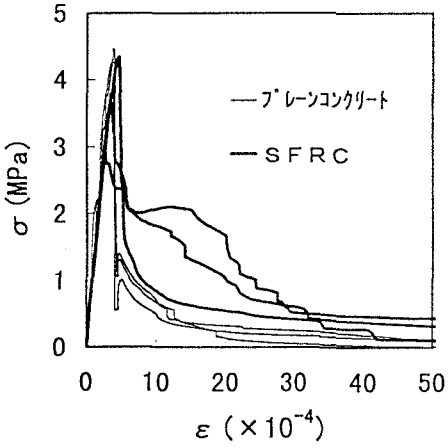
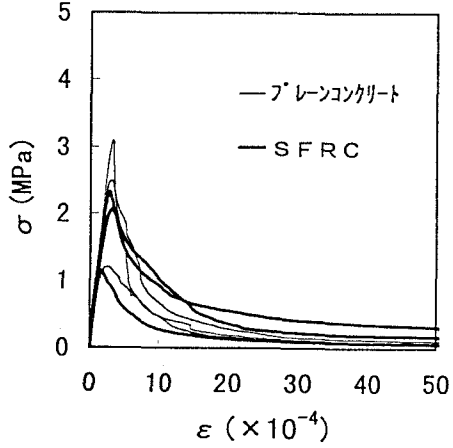


図 3 試験体の概念図

a の試験体は吹付面と平行にボーリングしたもので、b の試験体は吹付面と垂直にボーリングしたものである。

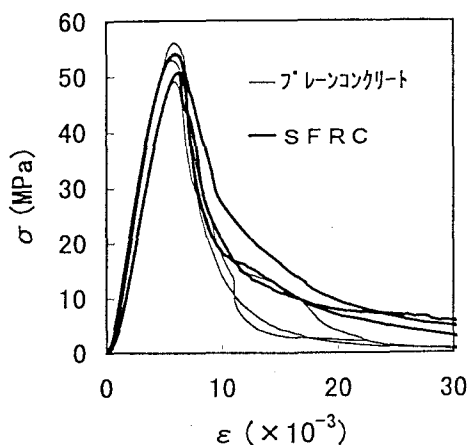


(a) 鋼繊維の配向方向に載荷

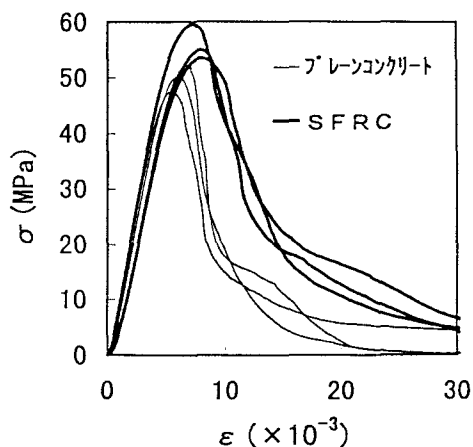


(b) 鋼繊維の配向方向に垂直に載荷

図 4 一軸引張試験での応力-歪曲線



(a) 鋼繊維の配向方向に載荷



(b) 鋼繊維の配向方向に垂直に載荷

図5 一軸圧縮試験での応力-歪曲線

ーンコンクリートと変わらない。このように圧縮特性に関しても、吹き付けてすぐの実施した試験結果と定性的に一致していることがわかった。2章で述べたように28日材令の圧縮試験が実施されている。しかしJIS A 1114で行っているため、本研究で行った試験方法と異なるが、その強度は40～60MPaと、本研究で得られた一軸圧縮強度とさほど変化していない。このことから耐久性はさほど低下していないことがわかる。

5. まとめ

SFRCの耐久性を調べるため、海岸での暴露試験などが報告されているが、まだまだデータが不足している。特に、長期間にわたって、実際の環境下でSFRCがどのように変化しているのかを調べた研究は非常に少ない。そこで本研究では吹き付け後、約20年経過したSFRCの耐久性に関して調査・試験を実施した。その結果、空気にふれている表面では錆が発生しているが、コンクリートに包まれている内部の鋼繊維はまったく錆びていないことがわかった。コンクリートの中性化も普通コンクリートより遅い速度でしか進行しおらず、コンクリート内部のpHも12程度であった。一軸引張試験および一軸圧縮試験を実施し、力学的特性が変化しているかを調べたが、吹き付け直後の特性と定性的には何ら変わりのないことがわかった。日本で比較的早くSFRCが用いられた場所から採取して今回の実験を行ったが、それでも20年である。SFRCはまだその歴史が浅く、今後50年、100年と経過した際の耐久性を地道に調べる必要はあると考える。本研究を遂行するにあたり、ご協力をいただいた日本セメント(株)上磯工場ならびに東京大学大学院 楊 勤氏に感謝の意を表する。

6. 参考文献

- 1) 土木学会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー第50号(1983)
- 2) 小林一輔他：土木学会論文集，第414号，V-12，p. 195～203(1990)
- 3) 黒井登起雄他：第49回土木学会年次学術講演概要集第5部，p. 562～563(1994)
- 4) 高木隼二：セメント・コンクリート，No. 389，6月号，p. 8～15(1979)
- 5) 井上寛美他：土木学会論文集，第391号，VI-8，p. 46～55(1988)
- 6) 福井勝則他：資源と素材，112[No. 2]，pp. 69～74(1996)
- 7) 楊勤他：平成8年資源・素材学会春季大会前刷，p. 178(1996)