

鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント の開発と実施工への適用

土橋 浩¹・小西 由人¹・中山 正夫²・松原 健太²・高橋 寛²

¹正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-6-2)

²正会員 (株) 大林組 首都高池袋南 JV 工事事務所 (〒171-0021 東京都豊島区西池袋 5-22-19)

首都高速中央環状新宿線の道路トンネルは、シールド工法を主体として8台のシールド機を用いて建設されており、いずれも二次覆工を省略したシールドトンネルである。そのため、セグメントには高い耐久性と耐火性が要求される。そこで、覆工構造の更なる品質向上とコスト縮減を目的として、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントを開発し、SJ51 工区～SJ53 工区（外回り）トンネル工事において60リングの実証施工を行った。鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントは、鋼製の短繊維を混入した、自己充填性能を有する高流動コンクリートにより製作したセグメントである。本稿では鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの概要と実施工への適用結果について報告する。

キーワード： シールドトンネル、セグメント、鋼繊維補強、高流動、二次覆工省略、品質向上

1. はじめに

首都高速道路株式会社が整備を進めている首都高速中央環状線（図-1 参照）は、都心への通過交通を迂回・分散することで交通渋滞を緩和し放射環状型のバランスのとれた交通ネットワークの形成を目的として、都心環状線の外側（都心から半径約8km）の場所に位置する総延長約47kmの環状道路で、総延長の6割弱にあたる約26kmが完成し供用中である。現在急ピッチで建設を進められている中央環状新宿線は延長11kmの路線で、

交通混雑の激しい道路での工事をスムーズに行うこと、周辺住民に与える工事の影響を軽減すること等により、シールド工法を主体として建設を進めている。シールドトンネルは二次覆工を省略しており、セグメントには高い品質・性能と耐久性が要求される。そこで、覆工構造の更なる品質向上およびコスト削減を目的として、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントを開発し、SJ51 工区～SJ53 工区（外回り）トンネル工事において60リング適用することとなった。

本報文では、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの開発概要と実施工への適用結果について報告する。

2. 鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの概要

(1) 鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの特徴

鋼繊維補強高流動コンクリート（以下、SFRC）セグメントは鋼製短繊維（写真-1 参照）を混入し、自己充填性能を有する高流動コンクリートにより

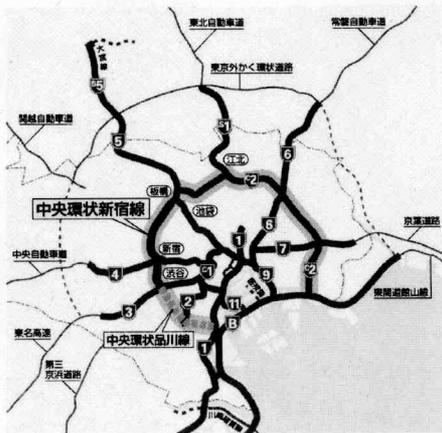


図-1 事業概要図

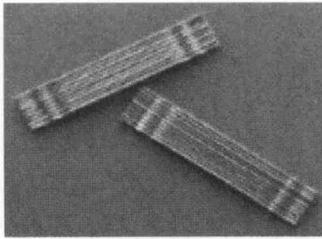


写真-1 鋼繊維

製作する。鋼繊維の補強効果を有効に活用することで、主鉄筋量を低減し、配力筋、フープ筋の省略を可能にするセグメントである。図-2 に SFRC セグメントと、従来型 RC セグメントの構造概念図を示す。本セグメントの特徴は下記のとおりである。

①耐久性・止水性の向上

- ・鋼繊維が均等に分散しているとひび割れが分散して発生するため、ひび割れ幅が小さくなる。
- ・鋼繊維が隅角部・端部にも充填されているのでセグメント端部の剥離・剥落が防止できる。

②構造性能の向上

- ・鋼繊維を混入することでコンクリート引張強度を構造計算上考慮できるため主鉄筋量が軽減できる。
- ・鋼繊維を混入することでせん断耐力が増加し、応力分散性能を確保できるため、配力筋が不要になる。
- ・鋼繊維を混入することで鉄筋の拘束効果が期待できることから、フープ筋が不要になる。

③耐火性能の確保

- ・従来型コンクリートや高流動コンクリートに比べて爆裂深さが小さく、加熱後の残存強度が大きい。

④セグメント製作の省略化

- ・主鉄筋量低減と配力筋・フープ筋省略により鉄筋加工・組立工程が簡略化できる。
- ・高流動コンクリートを用いることでセグメント製作時のテーブルバイブレータが不要になり、型枠の軽量化が図れる。また、将来的に現地製作を採用してセグメント製作コストをさらに縮減できる可能性がある。

(2) 使用材料

実用化したSFRCセグメント、および一般部に使用している従来型RCセグメントのコンクリートの使用材料とコンクリートの配合をそれぞれ表-2 に示す。コンクリートの設計基準強度は両セグメントともに $f'_{ck}=48N/mm^2$ である。

使用する鋼繊維は、分散性、コンクリートの充てん性、および取り扱いから、写真-1 に示したように両端フック付結束型で、径 $\phi 0.6mm$ 、繊維長さ $l=30mm$ のものとした。また、鋼繊維の混入率については、事前に $0.6 vol\%$ 、 $0.8 vol\%$ 、 $1.0 vol\%$ の3種類の配合を対象に、圧縮強度、曲げ強度、せん断強度等のコンクリート強度試験を実施し、強度特性が最も優れていた $0.8 vol\%$ を採用した。

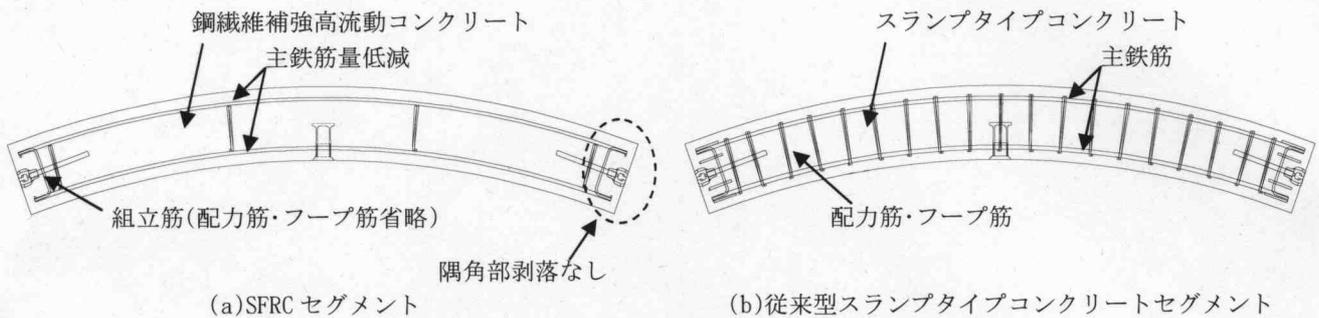


図-2 セグメント比較概念図

表-2 コンクリートの配合

コンクリート タイプ	粗骨材 最大径 (mm)	スランブ (7 σ -) (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤	鋼繊維混入量	
						W	C	F	S	G		容積比 (%)	単位量 (kg/m ³)
SFRC セグメント	20	67.5 ± 5.0	3.0 ± 1.5	29.0	67.4	180	310	310	1037	501	SP	0.8	63
従来型 RC セグメント	20	3.0 ± 1.5	2.0 ± 1.0	29.0	41.0	125	215	215	765	1116	AE	-	-

表-3 確認試験一覧

開発目的	試験	結果・評価
耐久性・止水性の向上	単体曲げ試験	試験後供試体のひび割れが分散して発生していることを確認
	充てん分散状況確認試験	X線写真により、鋼繊維が均等に分散していることを確認
	推力試験	推進時のシールドジャッキ推力に対して、ひび割れの発生がないことを確認
構造性能の向上	曲げ圧縮破壊試験	主鉄筋量を低減しても従来型以上の変形耐力を有していることを確認
		鋼繊維が鉄筋の拘束効果を有することを確認（フープ筋省略可能）
	単体曲げ試験	主鉄筋量を低減しても従来型と同等の耐力を有することを確認
	主鉄筋応力分布確認試験	配力筋を省略した場合でも従来型よりも均等の主鉄筋応力分布になることを確認（配力筋省略可能）
	リング間継手（ほぞ）せん断試験	ほぞのせん断耐力が増加し、優れたせん断連機能有していることを確認
	継手引抜試験	鋼繊維混入による継手周りの応力分散効果を確認
耐火性能の確保	耐火試験	耐火被覆を設置した場合コンクリート内部の温度履歴は従来型と同等であることを確認
		耐火被覆無しの場合従来型よりも爆裂深さが小さく、加熱後の圧縮強度・曲げ強度の残存率が高いことを確認

3. 性能確認試験の概要

本セグメントの開発にあたっては、表-3 に示す試験を実施した。本稿では表-3 のうち着色した項目に関して詳述する。

(1) 単体曲げ試験

本試験は、鋼繊維による引張強度を期待して設計したセグメントが、所要の曲げ耐力を確保しているか確認するために実施した。

a) 試験概要と目的

試験に用いた供試体は、実施工への適用時と同形状のセグメント（外径φ11,800mm、桁高450mm、幅1,500mm、9等分割）のA型セグメントを使用した。SFRCセグメントの鉄筋は、鋼繊維の補強効果に期待し、従来型RCセグメントに比べ主鉄筋量を10.6%低減し、配力筋及びフープ筋を省略している。SFRCセグメント、および従来型RCセグメントの鉄筋量を表-4に示す。

試験概要図を図-3に示す。試験は、支持スパン3,728mm、載荷スパン600mmの2点集中載荷で両支点を可動として単純曲げを与える方法で行った。載荷は、ひび割れ発生までは25kNピッチ、その後

表-4 供試体鉄筋量

項目	RCセグメント	SFRCセグメント	
	外側主鉄筋	14-D22	8-D22+6-D19
内側主鉄筋	14-D25	8-D25+6-D22	
鉄筋量	主鉄筋断面積比	100%	89.4%
	鉄筋重量比（鋼繊維を考慮）	100%	66.0% (96.7%)

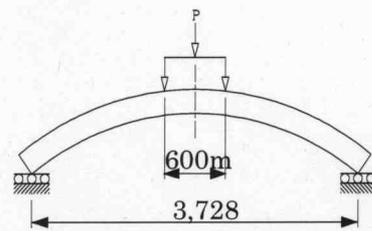


図-3 試験概要図

は50kNピッチを目安とし、破壊まで載荷した。

b) 試験結果及び考察

載荷荷重と供試体中央の変位の関係を図-4に示す。比較のため本工事で使用している従来型RCセグメントを対象にして行った試験結果も合わせて示す。また、図中には、参考として従来型RCセグメントの設計荷重（許容荷重）と、その5割増の荷重を付記している。

ひび割れ発生時の載荷荷重は、SFRCセグメントで450kN、従来型RCセグメントで300kNであった。その後は、ひび割れ発生による剛性低下から勾配が変化しており、載荷荷重1,000kNまでは同じような傾きを示している。SFRCセグメントは、載荷荷重1,400kNから変位量が大きく伸び、変位34mm

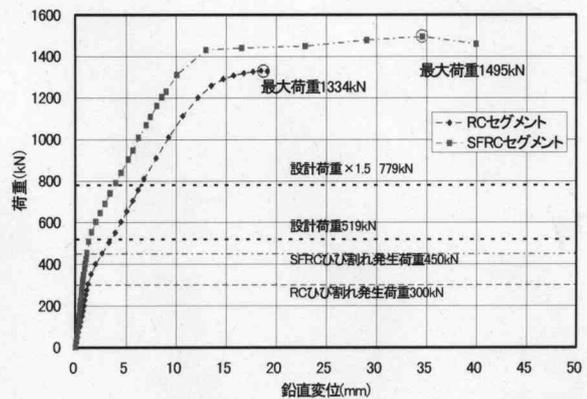
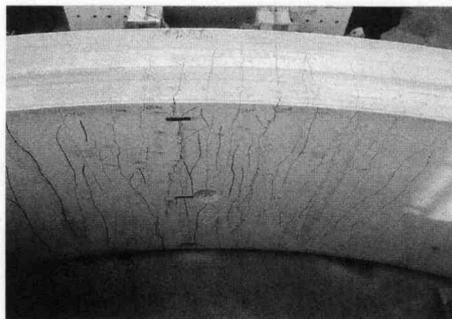


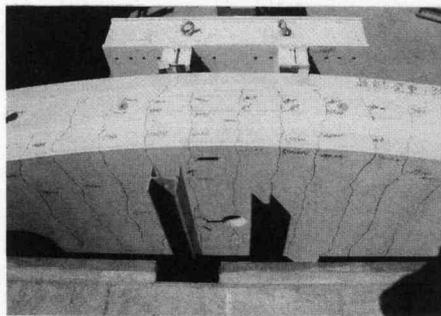
図-4 荷重-変位関係図

で最大荷重 1,495kN となった。一方、従来型 RC セグメントは、載荷荷重 1,200kN から変位量が大きくなり、変位 19mm で最大荷重 1,334kN となった。破壊に対する安全率（最大荷重／設計荷重）は、SFRC セグメントが 2.88、従来型 RC セグメントが 2.57 であった。SFRC セグメントは載荷荷重 1,400kN で鉄筋が降伏していると考えられるが、降伏後も大きく変位が増加していることから、鋼繊維の混入によりじん性の高いコンクリートセグメントであることが確認できた。載荷後のひび割れは、写真-2 に示すとおり、従来型 RC セグメントでは配筋筋の間隔にひび割れが発生しているのに対し、SFRC セグメントでは分散して発生している。

試験結果より、SFRC セグメントは鋼繊維の効果によって、従来型と同等の曲げ耐力があるとともに、耐久性に優れていることが確認できた。



(a)SFRC セグメント



(b)従来型 RC セグメント

写真-2 ひび割れ発生状況

(2) 主鉄筋応力分布確認試験

a) 試験概要と目的

SFRC セグメントは、鋼繊維補強によるコンクリートせん断強度の増加を期待して、従来のセグメントで配置されていた配筋筋を省略している。本試験では、配筋筋省略の可否を検証するために、セグメント幅方向の主鉄筋の応力分布状況を確認した。供試体は単体曲げ試験と同様の寸法とした。試験は、従来型 RC セグメントと SFRC セグメントのそれぞれに対して実施し、千鳥組を想定してリ

ング間継手面に埋込んだアンカー4ヶ所に載荷して、両端可動支持の状態で供試体に単純曲げを与える方法で行った（図-5 参照）。

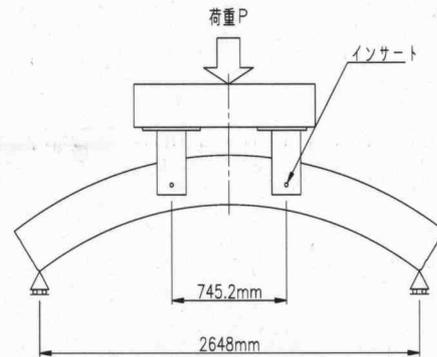


図-5 試験概要図

b) 試験結果及び考察

各載荷段階のうち代表して、3つの荷重レベルでの内面側主鉄筋の応力分布状況を図-6 に示す。荷重レベルの低い 100kN 載荷時では、従来型 RC セグメントと SFRC セグメントでは差異が見られず、以降の高い荷重レベルでは、主鉄筋の負担する応力は SFRC セグメントの方が従来型 RC セグメントに比べて小さい。また、両セグメントともに、載荷点付近に若干の応力集中が見られるものの、セグメント幅方向中心の主鉄筋に応力が伝達されている。鋼繊維が均等かつランダムに混入されることで、主鉄筋と配筋筋の両機能を有していることを示している。この結果から、鋼繊維補強により従来の配筋筋の効果が期待でき、SFRC セグメントでは配筋筋の省略が可能であることを確認できた。

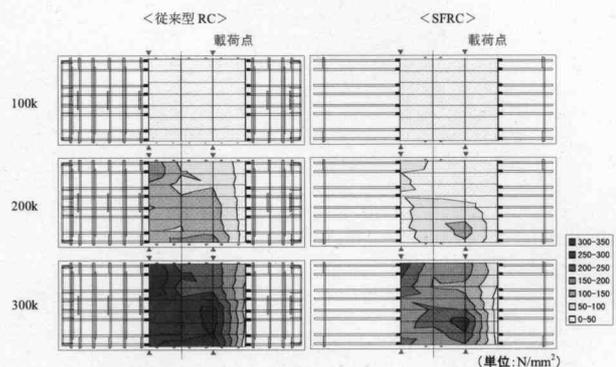


図-6 応力分布状況

(3) 曲げ圧縮破壊試験

a) 試験概要と目的

鋼繊維の拘束効果に着目し、従来のコンクリートセグメントで配置されていたフープ筋を省略した場合の、曲げ圧縮破壊時の挙動を確認した。試

験は図-7 の供試体に偏心軸圧縮力を载荷して行った。



図-7 供試体配筋図

b) 試験結果及び考察

荷重-ひずみ(圧縮側鉄筋, コンクリート)関係図を図-8に示す。荷重 $P=2,500\text{kN}$ 付近で圧縮鉄筋が降伏し、最大荷重 $P=3,208\text{kN}$ でコンクリートが圧壊した。鋼繊維補強の拘束効果により、圧縮鉄筋は降伏後も座屈することがなく、耐力はコンクリート強度により決定されることが確認された。

この結果から、鋼繊維補強により従来のフープ筋の効果が期待でき、SFRCセグメントではフープ筋の省略が可能であることを確認できた。

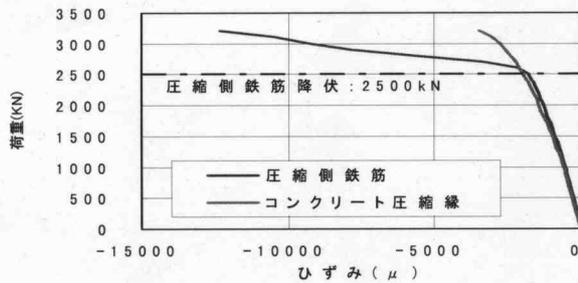


図-8 荷重-圧縮側ひずみ関係図

4. SFRCセグメントの実用化

前述した各種試験の結果から、本セグメントの実施工への適用が可能と判断し、本工事において60リング適用した。SFRCセグメント組立後のトンネル状況を写真-3に示す。組立後のSFRCセグメント表面の外観目視確認を行った結果、セグメント隅角部の欠損やひび割れの発生はなく、鋼繊維がセグメント端部まで均等に分散されていることが確認できた。

また、実施工においては、SFRCセグメントと従来

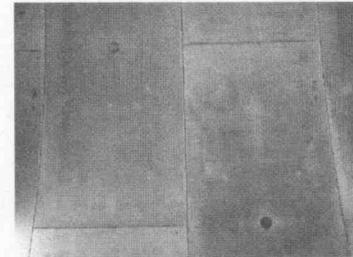


写真-3 組立後のSFRCセグメント

型 RCセグメントの応力状態を比較確認するために、両セグメントが隣接する箇所で、主鉄筋応力度、土圧、水圧、および層別沈下計による沈下計測を行った。計測断面図と鉄筋計設置位置図をそれぞれ図-9、および図-10に示す。

計測断面におけるトンネル天端の設計鉛直荷

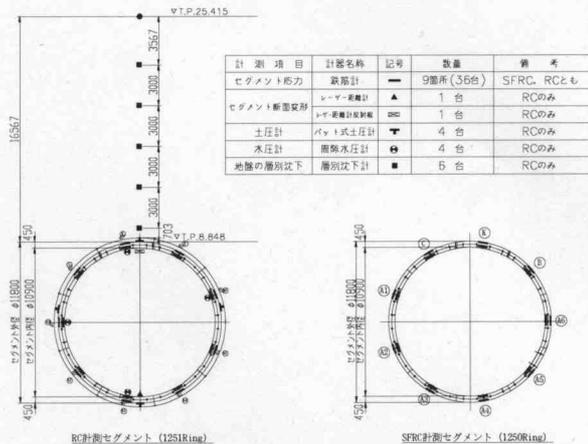


図-9 計測断面図

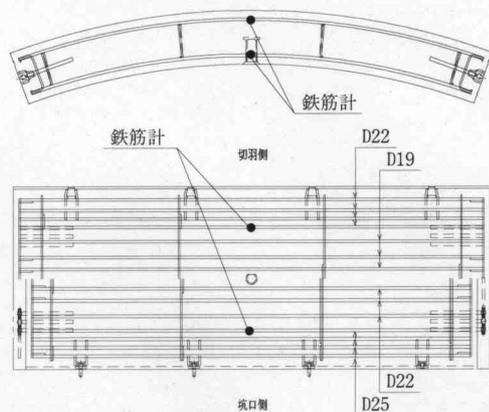


図-10 SFRCセグメント鉄筋計設置位置図

重は、全土被り土圧 (H=16.5m) で 245kN/m^2 、またトンネル天端の設計水圧は 84kN/m^2 である。これに対し計測結果は、計測値が安定した時点で、トンネル天端の土圧計計測値が 170kN/m^2 、トンネル天端の水圧計計測値が 110kN/m^2 であった。計測結果から求められる鉛直土圧は 60kN/m^2 であり、これを土被りに換算すると 6.5m となる。また、層別沈下計による地中変位量の計測値は、いずれの素子も 1mm 以下と微小であった。これらから、計測リング近傍においては、掘進による地山のゆるみは殆んど生じていなかったと想定される。

鉄筋応力の計測値について、図-11 に A3 ピースに設置した鉄筋計の経時変化を、図-12 に計測値が安定した時点における各ピースの鉄筋計の応力状態を示す。両セグメントのいずれの鉄筋計も圧縮側の応力を示しており、セグメントリングは全圧縮状態であった。これは前述の如く、計測位置においては、セグメントに作用している荷重は水圧が支配的であったことから、セグメントリングには軸力が卓越して作用していたためと考えられる。圧縮応力レベルは両セグメントとも、 $-30\sim-50\text{N/mm}^2$ 程度と同程度であった。

以上より、実施工を通じて SFRC セグメントは、従

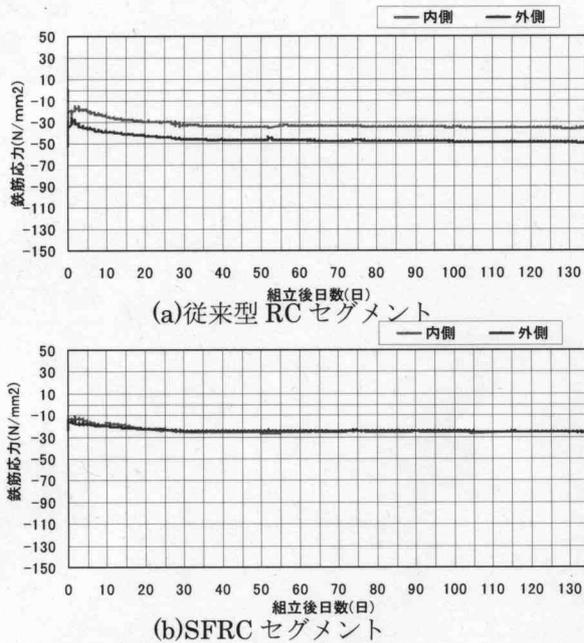


図-11 鉄筋計経時変化

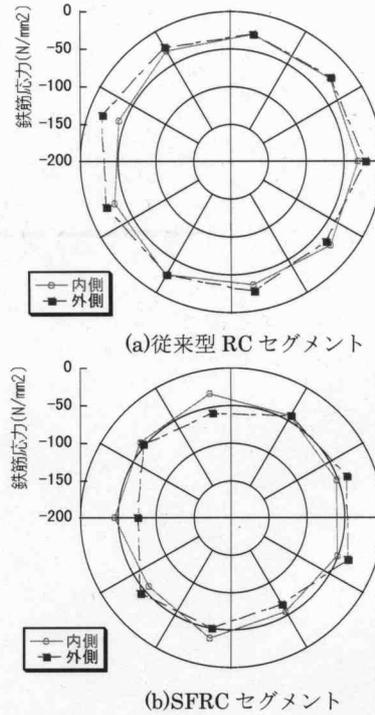


図-12 安定時鉄筋計応力分布

来型 RC セグメントと同等の応力状態になることを確認することができた。

5. おわりに

鋼繊維の補強効果を利用して主鉄筋量を低減し、配力筋・フープ筋を省略した SFRC セグメントは、従来型 RC セグメントと同等の耐力や圧縮鉄筋の拘束効果、セグメント幅方向の応力伝達効果を有している。今回、本セグメントを実施工に適用したが、組立後のセグメント隅角部の欠損やひび割れの発生がないことから鋼繊維が均等に分散されていることが確認でき、鉄筋の応力計測の結果、SFRC セグメントは、従来型 RC セグメントと同等の応力状態になることを確認することができた。

今後は、SFRC セグメントの構造性能を有効に活用してシールドトンネルに広く実用化を図るとともに、現地製作によるコスト削減を実現すべく検討を重ねていく予定である。