

鋼繊維補強コンクリートのシールドセグメントへの適用

Application of Steel Fiber Reinforced Concrete to Segmental Lining of Shield Tunneling

土橋 浩*, 小西由人**, 吉田公宏***, 松原健太****, 林 成卓*****, 藤井亜紀*****

Hiroshi Dobashi, Yoshihito Konishi, Masahiro Yoshida, Kenta Matsubara, Masataka Hayashi, Aki Fujii

*工修 首都高速道路株式会社 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)

**首都高速道路株式会社 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)

***(株)大林組 土木技術本部 設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

****大林・大豊・東急 SJ51~SJ53(外回り)トンネル特定建設工事共同企業体 (〒171-0021 東京都豊島区西池袋 5-22-19)

*****工修 (株)大林組 土木技術本部 技術第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

***** (株)大林組 土木技術本部 技術第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

The steel fiber reinforced concrete segmental lining (SFRC) has been developed to enhance its structural performances and to reduce the manufacturing cost comparing to a conventional RC segmental lining. The performance tests using a full scale model prove that, by adding steel fibers, the distribution bars and hoop bars can be eliminated and the amount of the main bars can be reduced. Upon satisfactory performance test results, the SFRC has been successfully applied to the underground expressway shield tunnel of 11.8m in outer diameter. This paper describes the design concept, the results and analyses of the full scale performance tests and the field application.

Key Words: shield tunnel, concrete segment, steel fiber, improve quality,

キーワード: シールドトンネル, コンクリートセグメント, 鋼繊維, 品質向上

1. はじめに

近年, シールドトンネルの分野では, 都市の過密化や公共事業費のコスト縮減に伴い, シールドトンネルの長距離化, 大深度化, 二次覆工の省略が進み, シールドトンネルの覆工構造には, 合理的かつ耐久性を有する品質の高いセグメントが求められている。セグメントの種類には, コンクリート, 鋼, 鋳鉄のほか, これらを組み合わせた合成構造があり, 中大口径のシールドトンネルでは, 一般にコンクリートセグメントが用いられることが多い。コンクリートセグメントは, 耐久性に富み, 耐圧縮性に優れているため, 土圧, 水圧やジャッキ推力などに対して高い抵抗力を持つが, 重量が大きく, 引張強度が小さいことから, 脆く, セグメント端部が破損しやすいため, 取り扱いには十分な注意が必要である¹⁾。

筆者らは, このようなコンクリートセグメントの弱点を改善し, 合理的かつ品質の高い覆工構造を実現することを目的に, 新しい構造の鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント (以下, 「SFRC セグメント」と記す) を開発し²⁾, 首都高速中央環状新宿線の SJ51 工区~SJ53 工区 (外回り) トンネル工事に適用した。これまでのコンクリートセグメ

ント (以下, 「従来型 RC セグメント」と記す) がスランブタイプコンクリートを用いて製作されるのに対し, SFRC セグメントは, 鋼繊維を混入した自己充填性を有する高流動コンクリートで製作するもので, 鋼繊維の補強効果に期待して従来型 RC セグメントに比べて鉄筋量を低減した新しい構造のセグメントである。

鋼繊維補強コンクリートは, 無筋コンクリートの脆性を改善することにより, 曲げ, 引張, せん断に対する抵抗能力を向上させた複合材料である。鋼繊維の均等な分散により変形性能が大きく, コンクリートの剥落を防止できることから, 山岳トンネルの吹付けコンクリートや二次覆工³⁾, さらに, ECL 工法における直打ちコンクリートなどに用いられている。また, 鋼繊維自身の防食性とコンクリート内部の鉄筋の防食性を有する⁴⁾ことから, 覆工体としての品質や耐久性の向上が期待できる材料である。一方, 高流動コンクリートは締固めが不要でセグメント製造工程を省力化できることから, 近年スランブタイプコンクリートの代わりにコンクリートセグメントに用いられる技術が開発されている⁵⁾。SFRC セグメントは, これらの特徴を生かし, 合理的かつ耐久性を有するコンクリートセグメントとして初めてシールドトンネルの一次覆工に適用したも

表-1 トンネル諸元

工事名称	SJ51 工区～SJ53 工区 (外回り) トンネル工事
発注者	首都高速道路株式会社
シールド外径	φ12.02m
トンネル延長	2,018.8m
一次覆工	RC セグメント : 811 リング (うち, SFRC セグメント 60 リング) 外径φ11,800mm, 桁高450mm, 幅1,500mm ダクタイルセグメント : 302 リング 外径φ11,800mm, 桁高400mm, 幅1,200mm 鋼製セグメント : 287 リング 外径φ11,800mm, 桁高400mm, 幅1,500mm
土質	武蔵野礫層, 東京層, 東京礫層, 上総層群
土被り	7.3～23.4m

のである。

SJ51 工区～SJ53 工区 (外回り) トンネル工事は, 首都高速中央環状新宿線のうち約 2,020m 区間を世界最大級の泥土圧シールドにより施工するもので, 二次覆工を省略したシールドトンネルである。トンネル諸元を表-1 に示す。SFRC セグメントは, このうち 90m 区間で適用した。

本稿では, シールドトンネルの覆工体としてのSFRCセグメントの特徴および構造概要を述べ, 実大性能試験で明らかにしたSFRCセグメントの構造性能と, 初めて外径φ11.8mのシールドトンネルに適用した結果について記述するものである。

2. SFRC セグメントの構造概要

2.1 SFRC セグメントの特徴

SFRCセグメントは, 鋼繊維を混入し, 自己充てん性を有する高流動コンクリートを用いて製作するものであり, 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-1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。

SFRCセグメントの特徴は以下に示すとおりである。

- ① 鋼繊維を均等かつランダムに混入することで, セグメント端部のはく離, はく落の防止, ひび割れの分散により覆工品質が向上する。
- ② 鋼繊維の混入により鉄筋腐食の進行も遅いことなどの特徴をあわせもつため, 耐久性の向上が期待できる。
- ③ 鋼繊維補強コンクリートは, ひび割れ発生後, ひび割れ幅が増大しても鋼繊維に引張力が伝達され, 耐荷力が残存するため, 鋼繊維が受け持つ引張応力を考慮した設計が可能となる。

- ④ 鋼繊維の補強効果による引張強度やせん断強度の増加を期待することで, 主鉄筋量の低減と配力筋の省略が可能になり, 鉄筋加工・組立や型枠への設置など製作工程の省力化が図れる。
- ⑤ 高流動コンクリートを併用することで, テーブルバイブレータによる振動締固め作業が不要になり, 型枠剛性が低下できるとともに, 製作設備の簡略化が図れる。
- ⑥ 製作時の環境負荷が低減できるためセグメントの現地製作が可能になり, 運搬時の重量にとらわれることなくセグメント分割数や幅を決定できるとともに, 積込, 輸送にかかわるコスト縮減が期待できる。

2.2 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, および表-3示す。こ

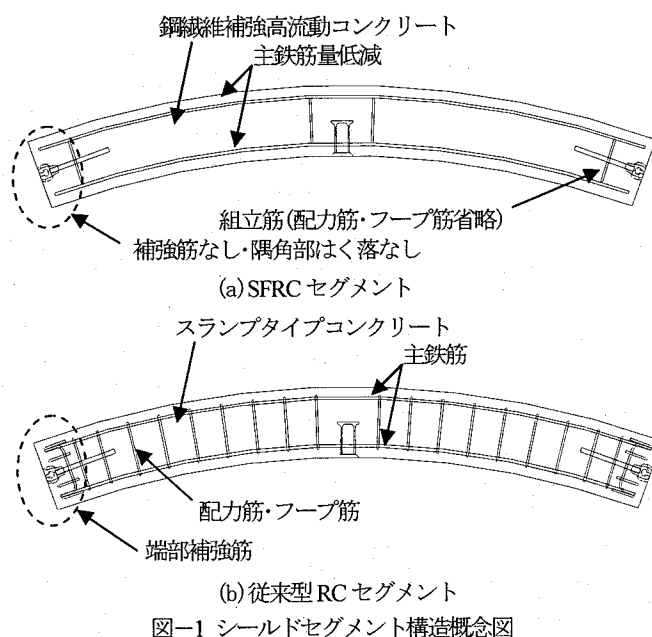


表-2 使用材料

使用材料	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランド, 密度: 3.16 g/cm ³
高炉スラグ微粉末	F	密度: 2.90 g/cm ³
細骨材	S	陸砂, 表乾密度: 2.62 g/cm ³
粗骨材	G	碎石, 表乾密度: 2.65 g/cm ³
AE 減水剤	AE	アミン系
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
鋼繊維	SF	両端フック付結束型(l=30mm, φ=0.6mm)

表-3 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 (mm)	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	—	—

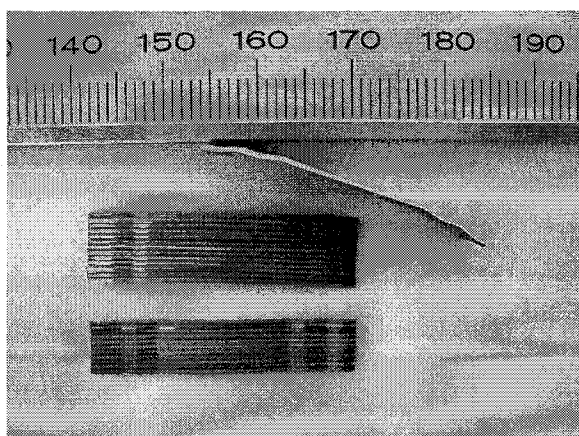


写真-1 鋼繊維（両端フック付結束型）

ここで、SFRCセグメントの配合は、高流動コンクリートを基本配合とし、粗骨材の一部を同じ表面積をもつ鋼繊維で置換し、減少した容積を細骨材で補う配合設計とした⁹⁾。各配合は、水粉体比（W/P）を同等とし、コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}=48\text{N/mm}^2$ である⁷⁾。

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に示す両端フック付結束型で、径 $\phi 0.6\text{mm}$ 、繊維長さ $l=30\text{mm}$ のものとした。また、鋼繊維の混入率は、事前に $0.6\text{ vol } \%$ 、 $0.8\text{ vol } \%$ 、 $1.0\text{ vol } \%$ の3種類の配合についてコンクリート強度特性試験を実施し、その結果、鋼繊維の使用効果を効率的に発揮できる $0.8\text{ vol } \%$ とした⁸⁾。

SFRCセグメントの外観を写真-2に示す。

3. 実大性能試験の概要

鋼繊維補強コンクリートをシールドセグメントに適用するにあたり、シールドセグメントの耐荷機構や構造特性を考慮し、所要の性能を確認できる試験が必要となる。

シールドトンネルの断面形状は、長期にわたって土圧や水圧に合理的に耐える形状という観点から、一般に円形断面が採用されている。シールドトンネルの設計は主として横断面に対して行われ、シールドセグメントは曲げモーメントと軸力を受ける部材として設計される。断面形状が円形であることから、部材に発生する断面力は軸力が支配的であり、曲げモーメントが小さいことから経済的な設計がなされている。また、シールドトンネルは分割されたセグメントを継手金物により連結して構成されていることから、継手部の剛性低下を補うため通常千鳥組みされ、この千鳥組みによる添接効果を期待した設計もなされている。この添接効果は、セグメント継手部の負担力の一部をリング継手を介してせん断伝達され、隣接するセグメント本体部が負担するものである。

以上のようなシールドトンネルの力学的挙動を勘案し、SFRCセグメントの構造性能を確認する試験として以下の試験を行った。

①単体曲げ試験

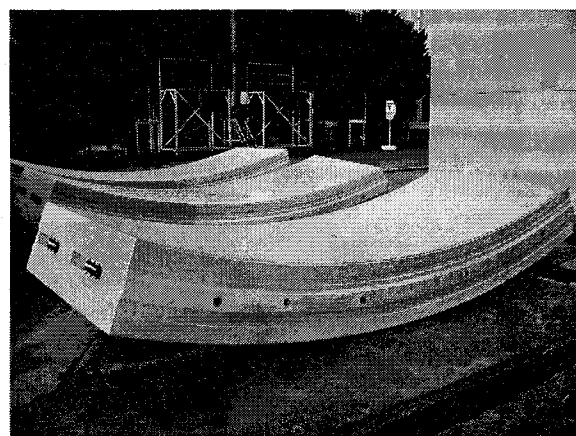


写真-2 SFRCセグメント外観

シールドセグメントの基本的な構造性能である曲げ性能について、ひび割れ発生後も鋼繊維が引張応力を負担することを期待し、主鉄筋量を低減して設計したSFRCセグメントが所要の曲げ耐力を確保できることを確認する。

②曲げ圧縮破壊試験

一般に、円形断面に用いられるシールドセグメントは軸力が卓越した状態であることから、軸力作用下での破壊性状の把握は重要である。従来型RCセグメントではフープ筋を配置することで圧縮鉄筋の降伏後の座屈防止を期待しているが、SFRCセグメントでは鋼繊維の補強効果に期待してフープ筋を省略している。曲げ圧縮破壊試験では、フープ筋を省略したSFRCセグメントの圧縮破壊性状を確認する。

③幅方向応力分布確認試験

セグメントは通常千鳥組みによる添接効果を期待した設計がなされ、セグメント継手部の負担力の一部はリング継手を介してセグメント本体部にせん断力として伝達される。従来のRCセグメントでは、配筋筋によりリング継手からセグメント本体へのセグメント幅方向の応力伝達を行い、設計上はこのセグメント本体を梁部材として扱っている。幅方向応力分布確認試験では、この添接効果を模擬して、リング継手に作用するせん断伝達力に対して、鋼繊維の補強効果に期待して配筋筋を省略したSFRCセグメントのセグメント幅方向の応力伝達性能の効果を確認する。

4. SFRCセグメントの実大性能試験

4.1 単体曲げ試験⁹⁾

(1) 供試体

試験に用いた供試体は、実施工への適用を考慮し、SJ51工区～SJ53工区（外回り）トンネル工事の一次覆工と同形状のセグメント外径 $\phi 11,800\text{mm}$ 、桁高 450mm 、幅 $1,500\text{mm}$ で9等分割のA型セグメントを使用した。SFRCセグメントの鉄筋量は、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% 低減している。なお、主

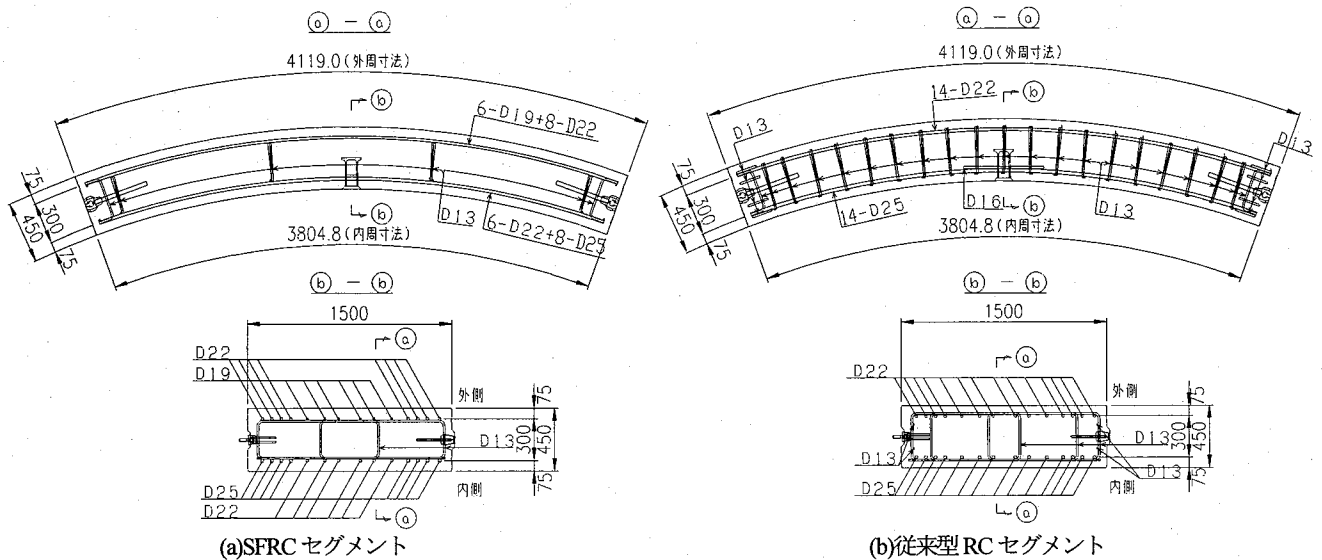


図-2 セグメント配筋図

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
主鉄筋断面積比率	100%	89.4%
鉄筋重量比率 (鋼繊維を考慮)	100%	66.0%
		(96.7%)

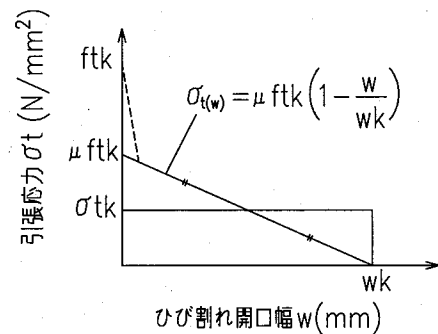


図-3 引張軟化曲線

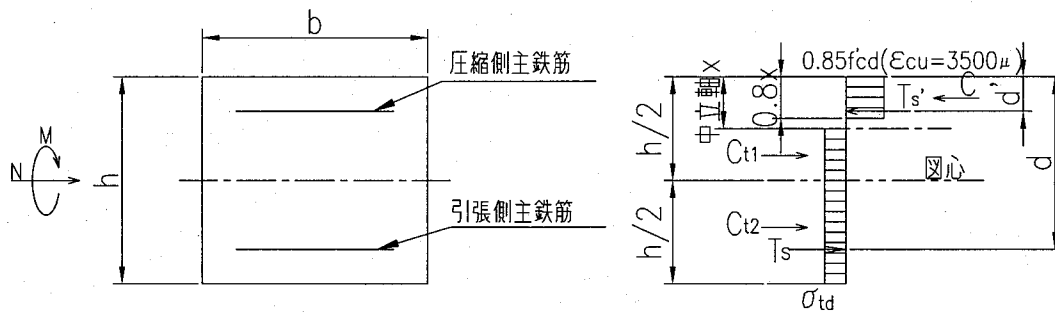


図-4 曲げ耐力算出モデル図

鉄筋の組み立て用にフープ形状の組立筋を外側、内側の主鉄筋の内側に4本のみ配置している。SFRCセグメント、および従来型RCセグメントの配筋図を図-2に示し、それぞれの鉄筋量を表-4に示す。

ここで、SFRCセグメントの主鉄筋量は、鋼繊維補強コンクリートに期待する引張応力を(1)式で、曲げ耐力を(2)式で計算し、この曲げ耐力が従来型RCセグメントと同等となるような鉄筋量とした。

鋼繊維補強コンクリートに期待する引張応力は、図-3に示す引張軟化曲線¹⁰⁾において引張縁のひび割れ幅が限界ひび割れ幅 w_k に達した時の平均引張応力を仮定した。

$$\sigma_{td} = \sigma_{tk} / \gamma_s = 0.80 (\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_{tk} = 1/2 \cdot \mu \cdot f_{tk} = 0.84 (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

ここに、

σ_{td} : 曲げ耐力計算時に用いる引張応力

σ_{tk} : コンクリートの引張応力

μ : 残留強度率(=0.55)¹⁰⁾

f_{tk} : コンクリートの引張強度の特性値
(=0.23 $f'_c k^{2/3}$ =3.04 N/mm²)

γ_s : 材料係数(=1.05)

また、曲げ耐力は図-4に示すようにコンクリートの圧縮応力度の分布を長方形分布(等価応力ブロック)¹¹⁾に、引張応力度の分布を長方形分布と仮定¹²⁾している。

$$M_u = C \left(\frac{h}{2} - 0.4x \right) + T_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) - \frac{C_{t1}(h/2 - x)}{2} + \frac{C_{t2}(h/2)}{2} + T_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、

- M_u : 曲げ耐力
- C : コンクリートの圧縮応力度の合力
- T_s' : 圧縮鉄筋の合力
- T_s : 引張鉄筋の合力
- C_u : 図心より圧縮側のコンクリート引張応力度の合力
- C_d : 図心より引張側のコンクリート引張応力度の合力
- h : 断面高さ
- x : 中立軸の位置
- d, d' : 有効高さ

(2) 試験方法

試験概要図を図-5に示す。試験方法は、支持スパン 3,728mm、荷重スパン 600mm の 2 点集中荷重で両支点は可動とした単純曲げを与える方法である¹³⁾。なお、荷重ピッチはひび割れ発生までは 25kN ピッチ、その後は 50kN ピッチを目安とし、破壊まで荷重した。

(3) 試験結果および考察

荷重荷重と供試体中央の変位の関係を図-6に示す。比較のため SJ51 工区～SJ53 工区（外回り）トンネル工事で使用されている従来型 RC セグメントで行った試験結果も合

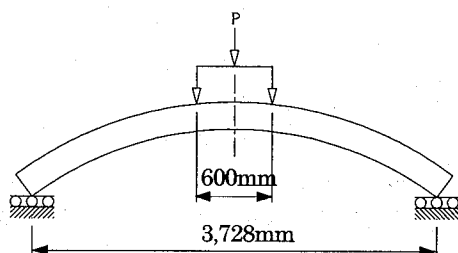


図-5 試験概要図

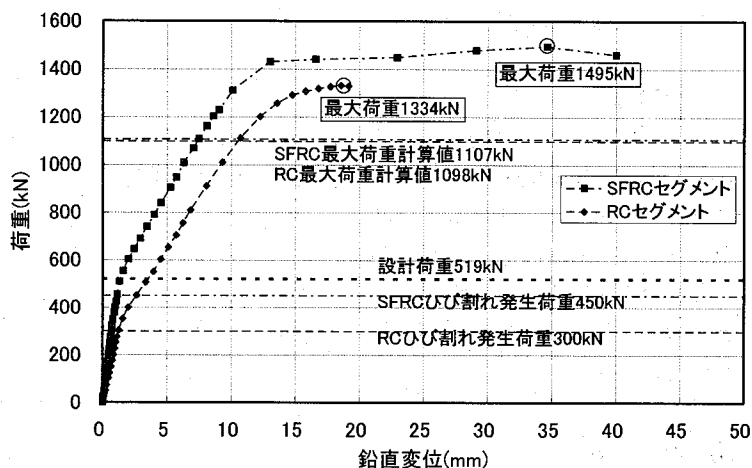
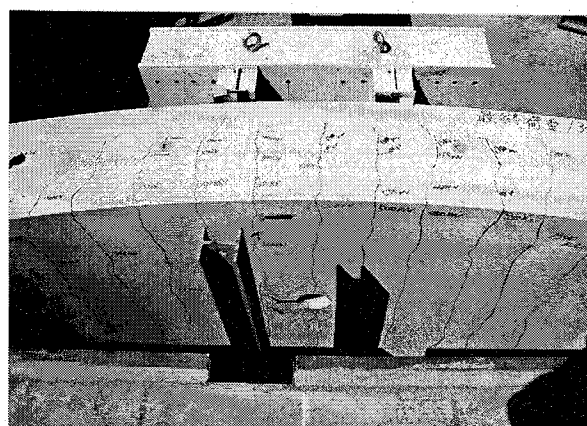


図-6 荷重-変位関係図



(a)SFRC セグメント



(b)従来型 RC セグメント

写真-3 ひび割れ発生状況

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、従来型 RC セグメントと SFRC セグメントの最大荷重計算値を付記している。

ひび割れ発生時の荷重荷重は、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、荷重荷重 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、荷重荷重 1,400kN から変位量が大きく伸び、変位 34mm で最大荷重 1,495kN となった。一方、従来型 RC セグメントは、荷重荷重 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 セグメントで 2.88、従来型 RC セグメントで 2.57 であった。また、SFRC セグメントは荷重荷重 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となっていることが確認できた。

荷重後のひび割れは、写真-3に示すとおり従来型 RC セグメントでは配力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 セグメントの曲げ耐力は鋼繊維の引張応力を適切に評価することで計算できると考えられる。

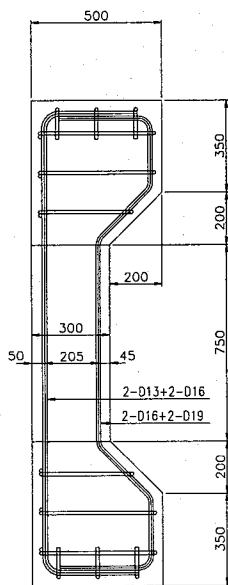


図-7 供試体配筋図

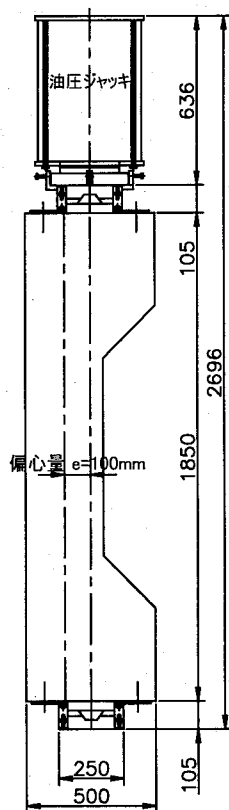


図-8 試験概要図

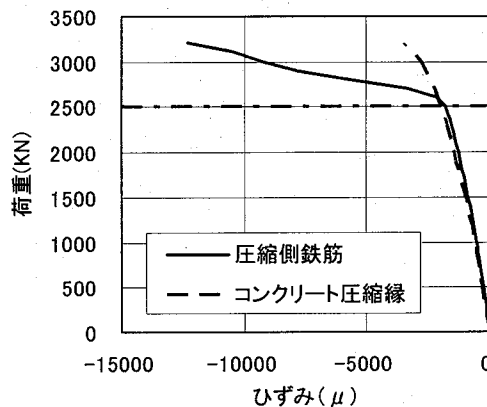


図-9 荷重-圧縮側ひずみ関係図

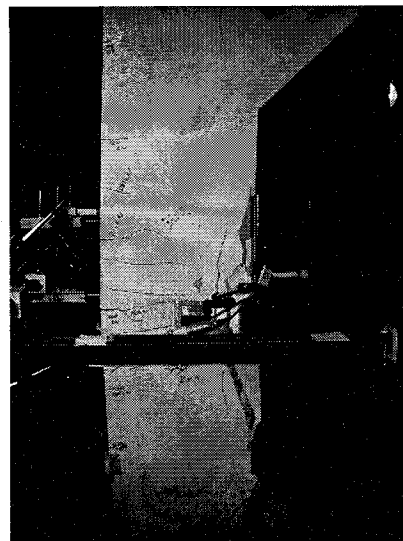


写真-4 コンクリート圧壊状況

4.2 曲げ圧縮破壊試験^{14),15)}

(1) 供試体

シールドトンネルでは一般に軸力が支配的であることから、曲げ圧縮破壊試験では圧縮破壊時の挙動を確認することを目的とした。供試体は、図-7に示すように実用化セグメントに比べて圧縮鉄筋を拘束するコンクリートのかぶりがない、厚さ 300mm、幅 500mm の平板型とし、試験は中央部にフープ筋を設置しない SFRC セグメントについて行った。

(2) 試験方法

試験概要図を図-8に示す。試験方法は、平板型供試体の中央部に、偏心軸圧縮を作用させることで、曲げモーメントと軸圧縮力を与える方法とした¹⁶⁾。この時の偏心量は 100mm とし、載荷ピッチは、ひび割れ発生までは 50kN ピッチ、その後は 100kN ピッチを目安とし、破壊まで載荷した。

(3) 試験結果および考察

載荷荷重と圧縮側鉄筋のひずみ、およびコンクリート圧縮縁のひずみ関係図を図-9に示す。載荷開始から破壊に至るまでの過程は、載荷荷重 900kN で初期ひび割れが発生し、その後載荷荷重 2,500kN で圧縮側鉄筋が降伏した。さらに、圧縮側鉄筋降伏後も荷重が増加し、最大荷重 3,208kN でコンクリートが圧壊した。コンクリートの圧壊状況を写真-4に示す。

従来型 RC セグメントはフープ筋を配置することで圧縮鉄筋の座屈防止を期待し、引張鉄筋が降伏後、圧縮側コンクリートの圧壊で破壊性状が決定され、断面耐力を評価している。本試験結果から、フープ筋を省略した SFRC セグメントでも圧縮鉄筋は降伏後も座屈することなく、耐力がコンクリート強度で決定されることが確認された。したがって、鋼繊維は圧縮鉄筋の拘束効果を有し、従来型 RC セグメントと同様に断面耐力が評価できると考えられる。

この供試体は、圧縮鉄筋を拘束するコンクリートのかぶりが小さいことから、実用化セグメントに対して安全側の設定となり、実用化トンネルへの適用は可能と評価した。

4.3 幅方向応力分布確認試験^{14),15)}

(1) 供試体

幅方向応力分布確認試験では、千鳥組みによる添接効果を模擬して、リング継手からのせん断伝達力に対して、梁部材として扱われるセグメント本体部の幅方向の応力分布状況を確認することを目的とし、これに使用する供試体は厚さ $h=300\text{mm}$ 、幅 $B=1,000\text{mm}$ とした。SFRC セグメントの供試体配筋図を図-10に、比較のため行った従来型 RC セグメントの配筋図を図-11に示す。ここで、幅厚比 B/h は実用化したトンネルのセグメントと同じである。

(2) 試験方法

試験概要図を図-12に示す。試験方法は、リング継手面にあらかじめ埋込んだインサート4ヶ所に、M24(10.9)のボルトで接合した治具から载荷し、両端可動支持の単純曲げを与える方法とした。この時の支持スパンは2,648mm、载荷スパンは745.2mmである。

なお、载荷ピッチはひび割れ発生までは10kNピッチ、その後は20kNピッチを目安とし破壊まで载荷した。

応力分布状況は、図-13に示すように全ての内面側主鉄筋に4箇所ずつ貼付したひずみゲージで計測する。

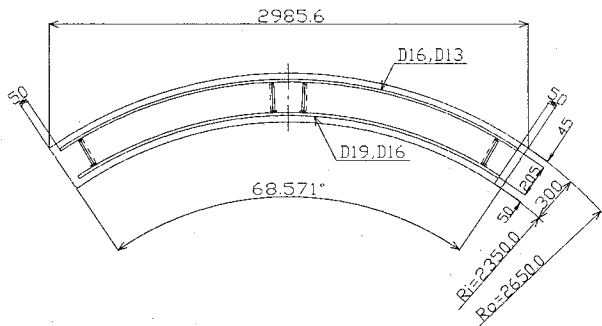


図-10 SFRCセグメント配筋図

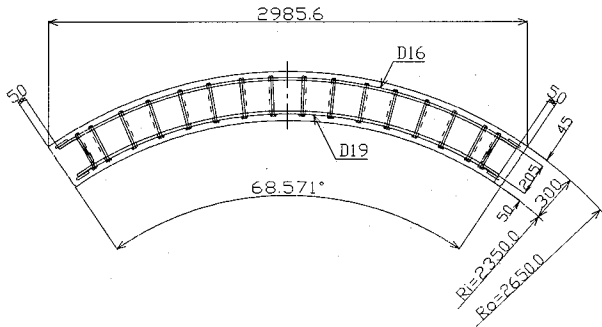


図-11 従来型RCセグメント配筋図

(3) 試験結果および考察

測定した主鉄筋応力について、各载荷段階のうち代表して3つの荷重レベルにおける主鉄筋の応力分布コンター図を図-14に示す。

荷重レベルの低い100kN载荷時では、SFRCセグメントと従来型RCセグメントでは差異が見られない。以降、荷重レベルが上がると、主鉄筋が負担する応力はSFRCセグメントの方が小さい。また、セグメント幅方向への応力伝達は、SFRCセグメントも従来型RCセグメントも载荷点付近に若干の応力集中があるものの、中央部への主鉄筋に応力が伝達されていることが分かる。試験結果より、鋼繊維が均等かつランダムに混入されることで、応力の配分効果が確認できるとともに、主鉄筋と配力筋の両機能を有し

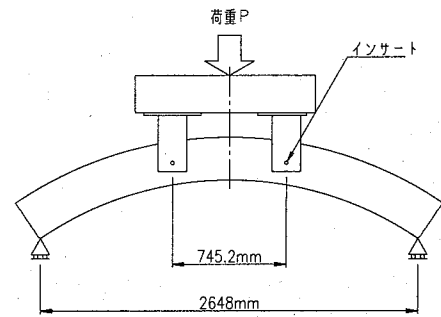


図-12 試験概要図

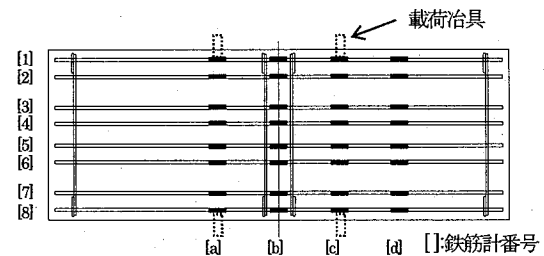


図-13 内面側鉄筋計位置図

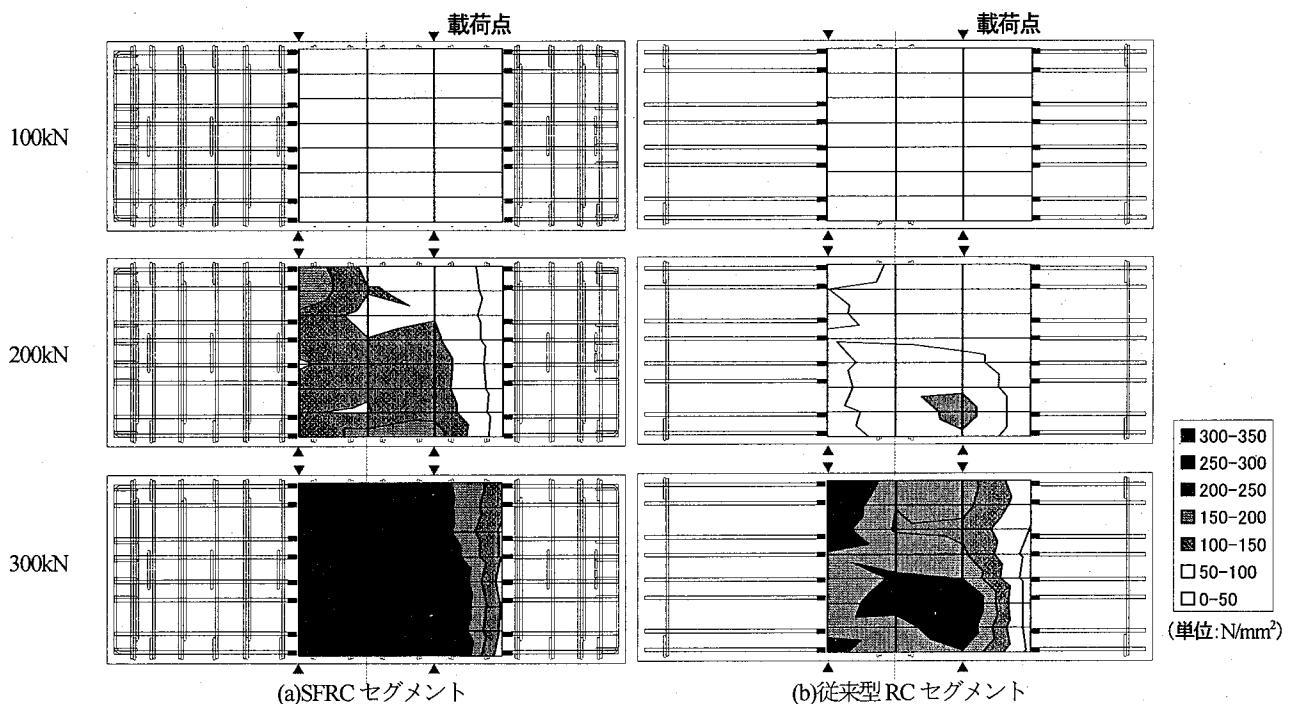


図-14 応力分布コンター図

ているといえる。したがって、配力筋を省略した SFRC セグメントでは、鋼繊維の補強効果により従来型 RC セグメントと同等の幅方向の応力伝播がなされる。また、設計で評価する構造モデル（梁-ばねモデル）においても、SFRC セグメントはこれまでの従来型 RC セグメントと同様に梁部材として扱えることが分かった。

4.5 実大性能試験のまとめ

鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントについて、実大試験結果から得られた知見を以下に示す。

- ① 単体曲げ試験では、鋼繊維補強によるコンクリートの引張応力を期待し主鉄筋量を減少した場合でも、従来型 RC セグメントと同等の耐力が確保できる。したがっ

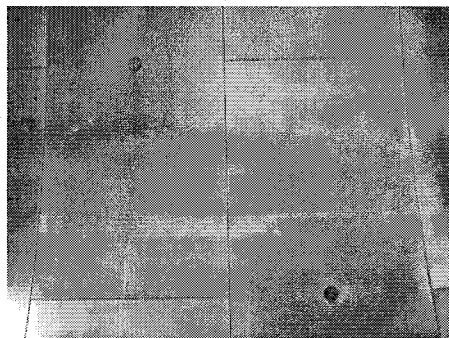


写真-5 SFRC セグメント外観

- ② 曲げ圧縮破壊試験では、圧縮側鉄筋が降伏した後も座屈することが無く、耐力がコンクリート強度で決まっていることから、鋼繊維による圧縮鉄筋の拘束効果がある。したがって、フープ筋を省略しても従来型 RC セグメントと同様に曲げ圧縮に対する断面耐力が評価できる。
- ③ 添接効果を模擬し、リング継手せん断力が作用した場合のセグメント幅方向応力分布確認試験では、セグメント幅の中央部の主鉄筋まで応力伝達が行なわれることが確認できた。したがって、SFRC セグメントでは通常配置される配力筋の省略が可能であり、構造モデル（梁-ばねモデル）においても従来型 RC セグメントと同様に梁部材として扱える。

5. SFRC セグメントの実用化

4項で述べたように、実大性能試験の結果、SFRC セグメントの耐荷機構や構造性能を確認できたことから、SFRC セグメントを SJ51 工区～SJ53 工区（外回り）トンネル工事に実用化した。SFRC セグメント組立後のトンネル状況を写真-5 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、コンクリートの隅角部の欠損やひび割れの発生はなかった。

現地では、組み立てられた SFRC セグメントの応力状態を確認するため、主鉄筋応力度の計測を行った。また、従来型 RC セグメントとの応力状態の比較、および地中での荷重状態を把握するため、計測計器を取り付けた SFRC セグメントに隣接する従来型 RC セグメントの断面で、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。計測位置図と鉄筋計位置図をそれぞれ図-15、および図-16 に示す。

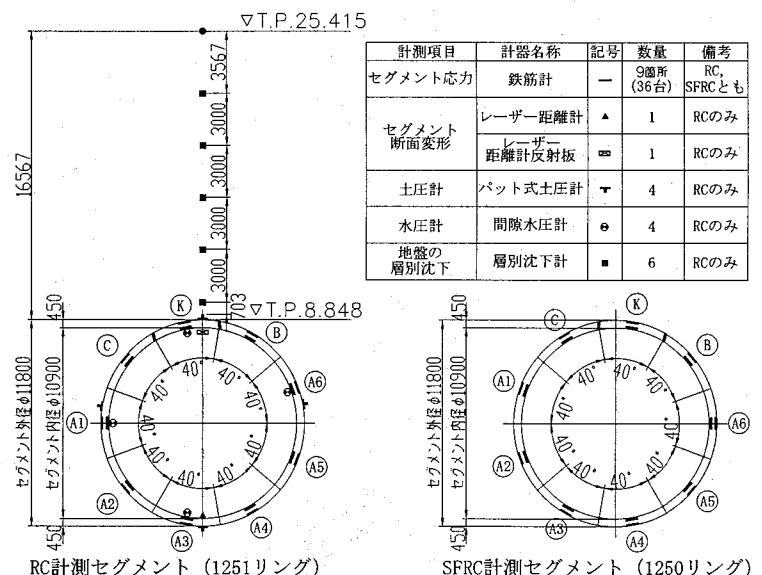


図-15 計測断面図

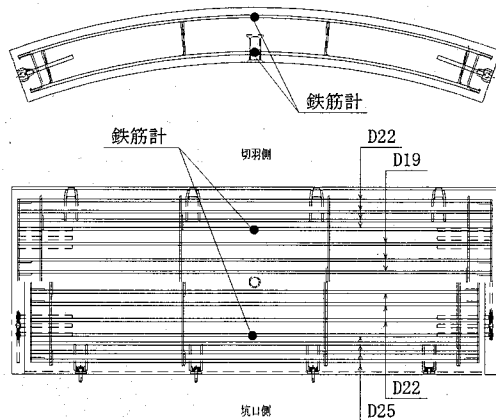


図-16 SFRC セグメント鉄筋計位置図

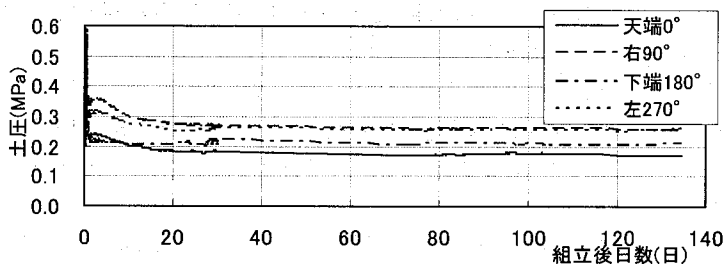


図-17 土圧計グラフ

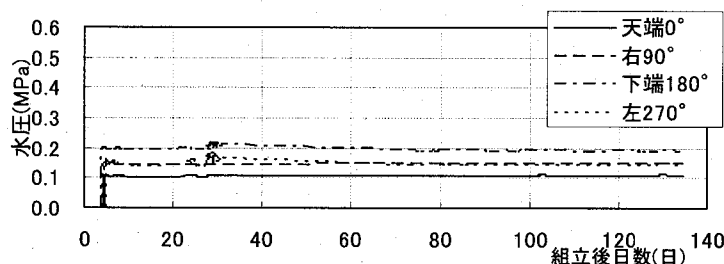


図-18 水圧計グラフ

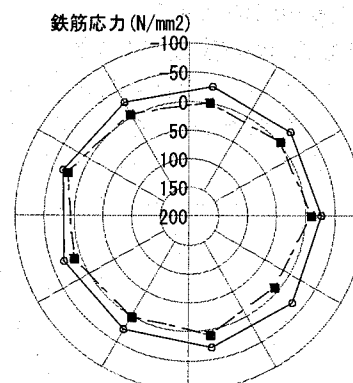
土圧計および水圧計のセグメント組立後からの経時変化を図-17、図-18に示す。土圧計は、テールブラシや裏込注入などの施工時荷重の影響を受け、最大0.6MPa程度まで上昇しているが、組立後約15日から安定して推移しており、天端では0.17MPa程度になっている。また、水圧計の測定値はほぼ一定であり、天端で0.11MPaとなっているため、鉛直土圧は0.06MPa程度と推測できる。設計における天端の鉛直荷重は全土被り土圧で0.24MPa、水圧0.08MPaであったため、設計よりも土圧が小さく水圧が支配的であることが分かった。

セグメント組立後135日における主鉄筋応力計測結果を図-19に示す。SFRCセグメント、RCセグメントともに曲げが小さく、全圧縮状態となっている。発生応力の大きさは、RCに比べてSFRCの方が全体的に小さく、そのばらつきも小さい。

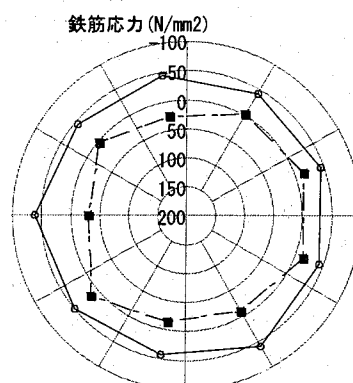
以上より、SFRCセグメントは地中のシールドトンネルにおいても従来型RCセグメントと同等以上の性能が確保できることが確認された。

6. おわりに

従来のスランブタイプのコンクリートに代わり、鋼繊維補強コンクリートを用いることで、従来配置していた主鉄筋量を低減し、配力筋・フープ筋を省略する新しい構造のSFRCセグメントを考案し、外径φ11.8mシールドトンネルへ適用した。適用にあたっては、鋼繊維の補強効果に期待して鉄筋量を低減したSFRCセグメントの構造性能を実大性能試験で確認した。実大性能試験は、シールドトンネルの耐荷機構を考慮し、単体曲げ試験、曲げ圧縮破壊試験ならびに幅方向応力分布確認試験の3種類を実施した。試験の結果、SFRCセグメントは従来のRCセグメントと同等の耐力、破壊形態、およびセグメント幅方向の応力伝達能力を有し、従来のRCセグメントと同様の設計手法が適用できることを確認した。また、外径φ11.8mの道路シ-



(a)SFRC セグメント



(b)従来型 RC セグメント

---■--- 外面応力-内面応力(N/mm²) [+:正曲げ, -:負曲げ]
—○— 平均応力(N/mm²) [+:引張, -:圧縮]

図-19 鉄筋応力分布

ルドトンネルにおいて90m区間で適用した結果、組み立てられたセグメント端部の欠けやひび割れは発生せず、耐久性の高い覆工構造が実現できた。さらに、現地での鉄筋応力計測を行った結果、地中のシールドトンネルにおいても従来のRCセグメントと同等以上の性能が確保できることを確認した。

また、SFRCセグメントの実用化に対しては、二次覆工省略型道路トンネルであったことから、耐火性能の確認も行っている^{17),18)}。今後は、SFRCセグメントの構造性能や耐火性能を有効に活用できるシールドトンネルセグメントに広く実用化を図る予定である。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説、1996.7
- 2) 藤井 亜紀、土橋 浩、角田 浩、松原 健太、小林 一博：鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント開発の概要、土木学会第59回年次学術講演会概要集、6-001、2004.9
- 3) 安田 敏夫、酒井 松男、岡澤 祐三、赤井 知司：二次覆工に適用する鋼繊維補強高流動コンクリートの特性に関する一考察、土木学会第58回年次学術講演会概要集6部門、pp.7-8、2003.9
- 4) 小林 一輔、星野 富夫、辻 恒平：海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果、土木学会論文集第

414号/V-12,pp.195-203,1990.2

- 5) 花見 和則,松裏 寛,岩藤 正彦,秋田谷 聡:高流動コンクリートセグメントの開発(1)—製造システム—,土木学会第53回年次学術講演会,VI-25,pp.50-51,1998.10
- 6) 例えば,土木学会:コンクリートライブラリー50 鋼繊維補強鉄筋コンクリート設計施工指針(案),1983.3
- 7) 上原 匠,堀田 新之介,糸川 豊,平原 秀樹,梅原 秀哲:高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計に関する研究,土木学会第57回年次学術講演会概要集第5部門,pp.991-992,2002.9
- 8) 浦野 知子,角田 浩,小西 由人,高橋 寛,若林 正憲:鋼繊維補強高流動コンクリートの強度特性とRCセグメントへの適用性,土木学会第59回年次学術講演会概要集,6-002,2004.9
- 9) 藤井 亜紀,土橋 浩,小西 由人,伊藤 信次,小林 一博:外径 ϕ 11.8m鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント単体曲げ試験,第60回年次学術講演会講演概要集,6-118,2005.9
- 10) 土木学会:コンクリートライブラリー97 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案),1999.11
- 11) 例えば,土木学会:コンクリート標準示方書[構造性能照査編],2002.3
- 12) 例えば,日本鉄鋼連盟:2002年改訂鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル・トンネル編[第2版],技報堂出版,2002.11
- 13) 日本下水道協会:シールド工事に用標準セグメント,2001.7
- 14) 吉田 公宏,角田 浩,小西 由人,伊藤 信次,橋本 博英:鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの実大性能試験,土木学会第59回年次学術講演会概要集,6-003,2004.9
- 15) 吉田 公宏,藤井 亜紀,林 成卓:鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントの実大性能試験,トンネル工学論文集第14巻,pp.151-158,2004.11
- 16) 日本トンネル技術協会:平成2年度 東京湾横断道路実物大セグメント性能確認試験 報告書,1991.5
- 17) 浦野 知子,林 成卓,土橋 浩,角田 浩:鋼繊維補強コンクリートの耐火性能,コンクリート工学年次論文集 vol.26,NO.1,pp.321-326,2004.7
- 18) 林 成卓,小西 由人,遠藤 康裕,近藤 由也,小林 一博:鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの耐火試験,第59回年次学術講演会講演概要集,6-323,2004.10

(2005年9月10日受付)