

高流動鋼繊維補強コンクリートによる

トンネル二次覆工の施工

－高知自動車道（四車線化）桧生トンネル工事における施工事例－

Construction of Tunnel Inner Lining with Self-Compacting Steel-Fiber-Reinforced Concrete

- Case study of Hinokio Tunnel (Phase II) Project on the Kochi Highway -

笠松 孝治¹⁾・小川 澄¹⁾・伊藤 省二²⁾・畔高 伸一³⁾・福田 博光³⁾

Hiroji KASAMATSU, Kiyoshi OGAWA, Shouji ITO, Shinichi AZETAKA and Hiromitsu FUKUDA

The Japan Highway Public Corporation (JH) uses steel-fiber-reinforced concrete for tunneling projects in ground category D, for the purpose of preventing tunnel inner lining from spalling, and achieving better durability. Since the JH specifies the use of both reinforcing steel bars and steel-fiber-reinforced concrete for construction of tunnel portals, we developed self-compacting steel-fiber-reinforced concrete, and made trial and permanent placements, aimed at improving quality and work efficiency of the inner lining. The concrete developed was proved to compactly fill the forms, without needing compaction, thereby contributing to improving quality and work efficiency of the inner lining. This paper reports the characteristics of the self-compacting steel-fiber-reinforced concrete developed and construction results.

Key Words : Self-Compacting Steel-Fiber-Reinforced Concrete, Tunnel Inner Lining

1. はじめに

日本道路公団では、トンネル二次覆工コンクリートの剥離・剥落防止および長期耐久性の向上を目的として、2車線トンネルの地山区分D区間について鋼繊維補強コンクリートを採用している。高知自動車道（四車線化）桧生トンネル工事でも「鋼繊維補強覆工コンクリート施工基準（案）」¹⁾に準拠し、地山区分D区間に鋼繊維補強覆工コンクリートを施工してきた。同基準によると坑口部の補強鉄筋区間について、「鉄筋補強は従来どおりとし、それに加えて鋼繊維補強覆工コンクリートとする。」とされている。

当工事では、無筋区間で使用している鋼繊維補強コンクリートの配合では、補強鉄筋区間では鋼繊維や粗骨材が鉄筋を通過しにくいなど施工性の低下が原因となり、コンクリートの品質および出来映えが低下することを懸念した。このため、コンクリートの品質向上および施工性の改善を目的として、高流動鋼繊維補強コンクリートの検討・開発を行い、当工事の坑口部に採用した。本報告では、本工事に採用した高流動鋼繊維補強コンクリートの諸特性ならびに施工結果に関して報告する。

1) 正会員 日本道路公団 四国支社 高知工事事務所

2) 正会員 榊熊谷組 関西支店 土木事業部 土木部

3) 正会員 榊熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部

2. 施工概要

高知自動車道（四車線化）桧生トンネル工事は、四国山地のほぼ中央部にあたる高知県長岡郡大豊町に位置し、延長 $L=2,541\text{m}$ 、掘削断面積約 80m^2 の道路トンネルである。このうち、今回、高流動鋼繊維補強コンクリートの施工対象としたのは、トンネル両坑口の 45.15m （5スパン）である。図-1 に施工位置図を示す。また、施工数量を表-1 に、補強鉄筋配筋図を図-2 に示す。

表-1 施工数量

	無筋区間	鉄筋区間
施工延長 (m)	15.55	29.6
スパン数	2	3
打設量 (m^3)	123.7	290.7
鉄筋量 (kg)	—	15826

3. 配合の検討

3-1. 配合設計方針

今回の検討では、補強鉄筋区間でより高い品質と円滑な施工を目標に、締め固めを必要としない自己充填型のコンクリートとした。このため、フレッシュコンクリートに必要とする高い流動性と材料分離抵抗性を確保するため、石灰石微粉末を添加した粉体系のものを採用した。

3-2. コンクリートの仕様

表-2 に目標とする品質基準を示す。目標とする品質基準のうち強度特性は、日本道路公団 鋼繊維補強コンクリートの品質基準を満たすものとした。また、高流動鋼繊維補強コンクリートは施工事例が少なかったため、スランプフローなどのフレッシュ時の品質特性は、「高流動コンクリート施工指針」（土木学会）²⁾を参考に、試験施工等でフレッシュコンクリートの挙動を判断し、目標とする品質基準を決定した。

表-2 目標とする品質基準

設計基準強度 (N/mm^2)	スランプ・フロー (mm)	空気量 (%)	最低セメント量 (kg/m^3)	最大単位水量 (kg/m^3)	鋼繊維混入率 (%)	曲げ強度 曲げじん性
18	650 ± 50	4.5 ± 1.5	280	175	0.5 以上	基準線以上

3-3. コンクリートの配合

試し練り、試験施工を経て本施工で採用したコンクリートの配合と使用材料を表-3 に示す。

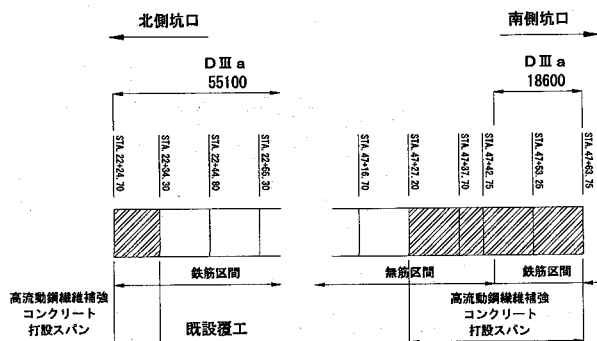


図-1 施工位置図

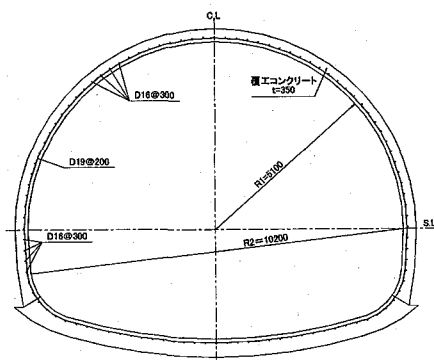


図-2 補強鉄筋配筋図

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	鋼繊維 混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 (P×%)
				W	C	L	S	G	
55	31.7	59.2	0.5	173	315	231	982	726	1.30

セメント(C) : 高炉セメントB種, 密度 3.02g/cm³, 比表面積 3940g/cm³
石灰石微粉末(L) : 密度 2.72g/cm³, 比表面積 4000g/cm³
細骨材(S) : 土佐町地蔵時字滝砕砂と中土佐町加江崎沖海砂の混合
表乾密度 2.79g/cm³, 吸水率 1.17%
粗骨材(G) : 土佐町地蔵時字滝砕石 2005, 表乾密度 3.01g/cm³, 吸水率 0.34%
混和剤(SP) : ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
鋼繊維(SF) : φ0.7×50mm: φ0.6×25mm=50:50 (質量比)

4. トンネル覆工模擬型枠による試験施工

4-1. 試験概要

本施工に先立ち、開発した高流動鋼繊維補強コンクリートの適用性、切り出し供試体による圧縮強度、鋼繊維の混入率及び配向性を確認するため、トンネル覆工模擬型枠による試験施工を行った。写真-1 にトンネル覆工模擬型枠を、図-3 に型枠形状及び各試験用コア供試体採取位置を示す。型枠内には鉄筋をアーチ周方向に D16@300mm, トンネル延長方向に D19@200mm で配筋し、コンクリート打設は実打設と同様に吹上げ方式で行った。また、鋼繊維の混入率、配向性の試験方法は馬場らの報告³⁾を参考に試験を実施した。

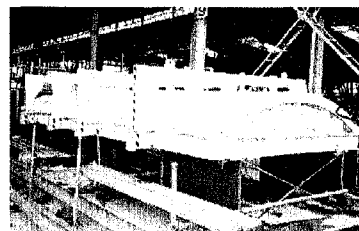


写真-1 トンネル覆工模擬型枠

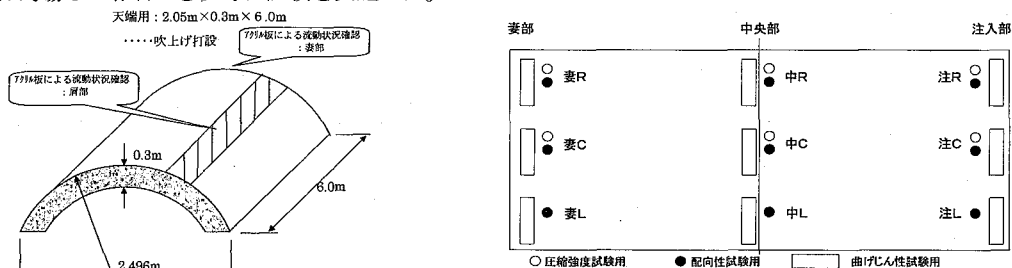


図-3 形状および各試験用コア供試体採取位置

4-2. 模擬試験体の物性

(1) コンクリート打設状況

コンクリートは模擬型枠内を流動し、バイブレーター等で締め固めを行わなくとも密実に充填した。表-4 にコンクリート品質試験結果を示す。

(2) 圧縮強度

図-4 に部位ごとのコア圧縮強度を示す。各部位の圧縮強度は設計基準強度 18N/mm²を十分に上回る 38.8~50.1N/mm²となり、全平均で 43.0N/mm²であった。

(3) 鋼繊維混入率

図-5 に部位ごとの鋼繊維混入率を示す。鋼繊維の実測混入率は全平均で 0.51%と、仕様混入率 0.5%を満足する結果となった。

表-4 コンクリート品質試験結果

	スランプ フロー (mm)	500mm フロー 到達時間 (sec)	フロー流動 停止時間 (sec)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
ベース	700×680	6.0	43.0	3.0	56.1
鋼繊維混入後	580×570	8.0	42.0	3.4	53.9

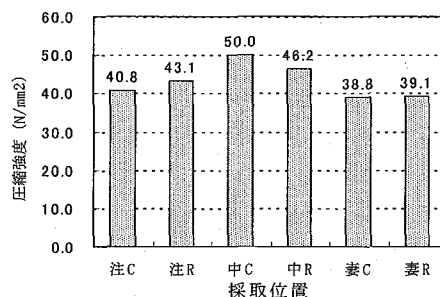


図-4 コア圧縮強度

また、部位ごとの平均鋼繊維混入率は注入部で0.57%、中央部で0.51%、妻部で0.45%と注入部から妻部にコンクリートが流動するに従い、低くなる傾向となった。

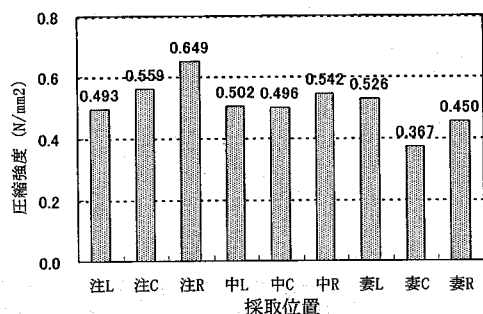


図-5 鋼繊維混入率

(4) 鋼繊維配向性

図-6 に部位ごとの鋼繊維配向性を示す。中央部は注入部及び妻部に比較して、掘削方向の配向係数が高く、これはコンクリート流動時に鋼繊維が流動方向に配列したためと考えられる。各部位の平均配向係数は0.57程度となり、鋼繊維はほぼ均一に部材内に配列しているものと考えられる。

(5) 曲げじん性

図-7 に切出した供試体の曲げじん性試験結果を示す。いずれの箇所も基準線をほぼ満足する結果であった。また、注入部の曲げじん性曲線に比べて、中央部・妻部の曲げじん性曲線は、基準線に近づいている。これは、先に述べたように、コンクリートが注入部から妻部に流動するに従い、鋼繊維の混入率が低くなるためだと考えられる。

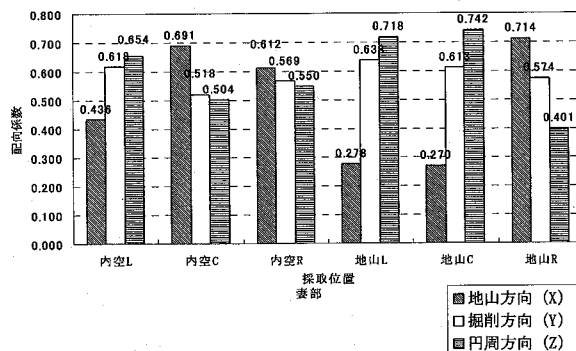
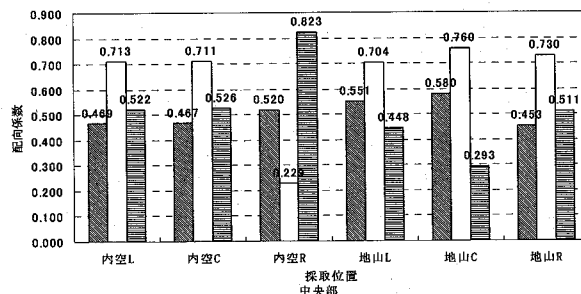
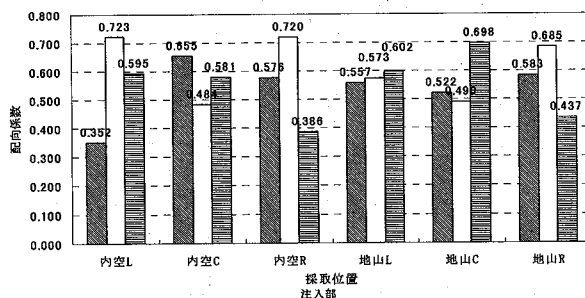


図-6 鋼繊維配向性

5. 坑口部での本施工

5-1. 施工方法

本施工では通常の振動締固めを行わず、コンクリートの自己充填性により打設を実施した。例外としてトラブル等で打設間隔が長いときは、コールドジョイントを防ぐため、振動締固め機を使用した。また、高流動コンクリートはセメントに及ぼす側圧が過剰であることが懸念されたため、側圧に液圧分布を想定し、写真-2 に示すセメント補強を行なった。打設速度は通常のコンクリートが 20m³ 毎時であるのに対し、高流動コンクリートを生産するプラントの限界能力である 18m³ 毎時を打設速度とした。

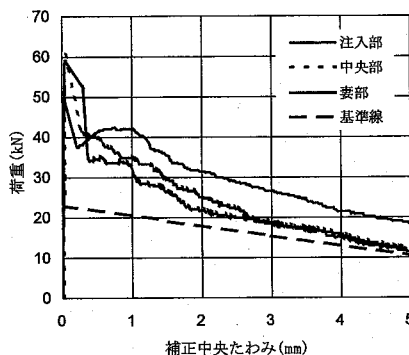


図-7 曲げじん性試験結果

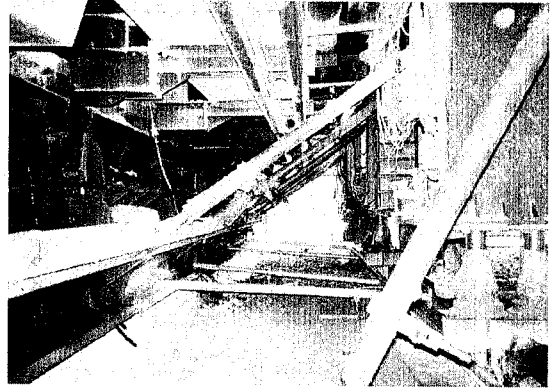
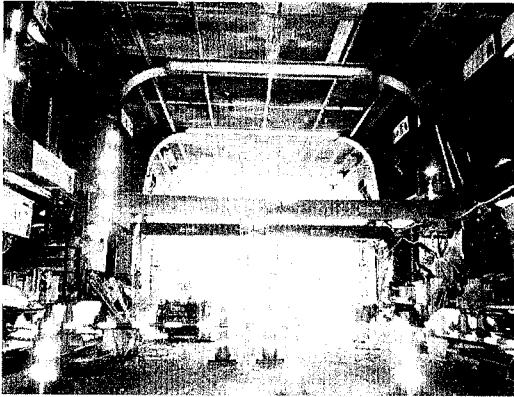


写真-2 セントル補強

5-2. コンクリート打設状況、品質管理試験結果

表-5 に今回の施工で実施したコンクリ

ートの品質管理項目を示す。

コンクリートは、無筋区間、鉄筋区間、いずれのスパンでも締固めを行わずとも、適度な流動性を保ちながら、材料分離することなく、密実に充填した。また、打設中のコンクリート天端面は、注入口からスパン端部までほぼ同じ高さであった。

表-5 品質管理項目

コンクリートの種別	品質管理試験項目				
	スランプフロー	空気量	塩化物含有量	圧縮強度	曲げ強度 じん性試験
ベース (SF 混入前)	1~5 台目 および 50m ³ 毎	1 台目 および 50m ³ 毎	午前 午後 各 1 回	7 日, 28 日 供試体 各 3 本	—
SF 混入 (SF 混入後)					供試体 4 本

(1) 空気量、スランプフロー試験結果

表-6 に空気量試験結果を示す。鋼繊維混入後の空気量は鋼繊維混入前のものに比べて、0~1.2%の範囲で増加している。これは、鋼繊維をアジテータ車に添加する過程で攪拌を行い、空気を巻き込んだためと考えられる。

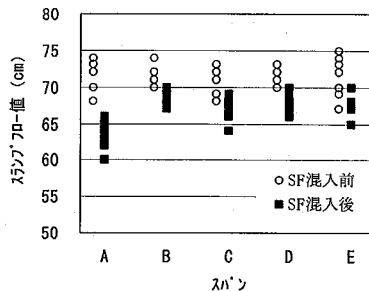


図-8 スランプフロー分布図

図-8 にスランプフロー分

布図を示す。鋼繊維混入前のスランプフローは 67~75cm であるのに対し、鋼繊維混入後は、鋼繊維混入によって 5~7cm 程度スランプフローロスが生じ、60~70cm であった。

(2) 圧縮強度試験結果

表-7 に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は設計基準強度 18N/mm² を十分上回る 54.4~64.8N/mm² であった。また、鋼繊維を混入することで強度が低下している場合も一部あったが、鋼繊維混入による圧縮強度への影響は明確に認められないことがわかる。

表-6 空気量試験結果

スパン名		空気量 (%)	
		SF 混入前	SF 混入後
A	1 台目	3.1	3.1
	50m ³	5.2	5.5
B	1 台目	3.2	4.0
	50m ³	3.5	4.7
C	1 台目	3.5	4.7
	50m ³	5.0	5.8
D	1 台目	4.8	5.4
	50m ³	3.2	3.3
E	1 台目	3.6	4.2
	50m ³	3.5	4.1
	50m ³	4.5	5.4

表-7 圧縮強度

スパン名	圧縮強度 (N/mm ²)	
	SF 無混入	SF 混入
A	58.3	54.4
B	59.1	58.7
C	58.1	59.5
D	60.6	64.8
E	55.2	56.0

(3) 曲げじん性試験結果

図-9 に A スパンの曲げじん性試験結果を示す。曲げじん性曲線は日本道路公団規定の基準線を上回っている。また、他のスパンについても曲げじん性曲線は基準線を上回っている。

5-3. コンクリート側圧計測結果

図-10 に鋼繊維補強コンクリート、高流動鋼繊維補強コンクリートそれぞれの打設高さ毎の側圧分布を示す。当初、高流動鋼繊維補強コンクリートは、液圧に近い側圧が作用し、通常の鋼繊維補強コンクリートよりも大きな側圧が生じると想定していたが、下端において、鋼繊維補強コンクリートが 37kN/m^2 であるのに対し、高流動鋼繊維補強コンクリートは 18kN/m^2 と約 50% の側圧であった。これについては、高流動鋼繊維補強コンクリートに粒径の小さい（比表面積の大きい）材料が多いため、コンクリート中の余剰水が少なく、また、夏季の施工であったために、高流動鋼繊維補強コンクリートの硬化が早かったことなども要因として考えられる。

6. まとめ

今回、高流動鋼繊維補強コンクリートをトンネル二次覆工に適用するため、様々な事前検討を行ってきた。以下に今回の検討、施工で得られた結果と今後の課題を示す。

(1) 高流動鋼繊維補強コンクリートは、自己充填性能が高く、補強鉄筋区間の施工性・品質向上を図ることが可能である。また、トンネル覆工の無筋区間への適用、あるいはトンネル覆工以外の自己充填性を必要とする狭小部等へ採用することで、コンクリートの品質・出来映えの向上さらには労務コストの削減をも図ることが出来ると考える。

(2) 今後の課題としては、生コン製造工場において安定した品質のコンクリート製造・運搬・供給を確実に行うとともに、受け入れ施工側における迅速な品質管理の実施・施工管理体制の確立、また、極力連続打設が可能な施工方法を採用しておく事が特に重要であると考え。現状では、粉体量、混和剤量の増加さらには品質管理項目の多様化により、材料コストは大きくなる。これを解決するには、高流動（鋼繊維補強）コンクリートの汎用化による施工実績の蓄積、積算体制の確立が必要と考える。

【参考文献】

- 1) 日本道路公団：鋼繊維補強覆工コンクリート施工基準（案），平成 11 年 12 月
- 2) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，平成 12 年 12 月
- 3) 馬場弘二，伊東哲男，城間博通：鋼繊維補強覆工コンクリートにおける繊維の配向・分散特性と有効に関する研究，日本道路公団試験研究所報告，vol. 38，pp60～69，2000

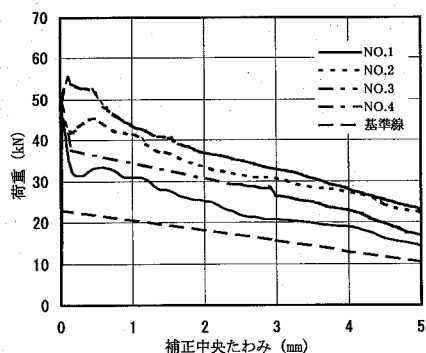


図-9 曲げじん性試験

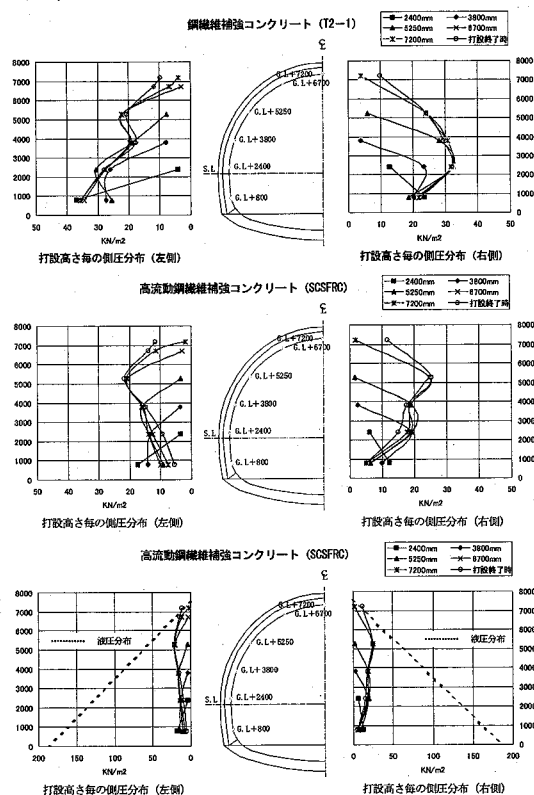


図-10 コンクリート打設高さ毎の側圧分布