

扁平な大断面トンネルにおける 高強度繊維補強覆工コンクリートの施工

Construction of large scale flat tunnel using high-strength fiber reinforced concrete lining

本田 和幸* 木村 雅哉*
Kazuyuki Honda Masaya Kimura
田中 義晴* 長谷川 匠一*
Yoshiharu Tanaka Syoichi Hasegawa

要 約

第二東名・名神高速道路の覆工コンクリートは、今まで経験のない扁平で大断面トンネルであることから、耐久性を考慮して地山等級C、Dでは、コンクリート中に鋼繊維（スチールファイバー）を混入することとしている。

当栗東トンネル上り線西（その2）工事においては、この高強度繊維補強覆工コンクリートを打設するにあたり、規定されている生コン性状、打設時間および硬化後のコンクリート性状を満足させるために、配合設計から覆工セントルの設計、生コンの打設方法までを検討し、現在、ジャンカ、縮模様等の無い高品質なコンクリートを施工中である。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 配合設計
- § 4. 全断面スライドセントルの設計
- § 5. 施工方法
- § 6. 施工実績
- § 7. おわりに

§ 1. はじめに

第二東名・名神高速道路のトンネルは、今まで経験のない扁平で大断面トンネルであることから、耐久性を考慮して、地山等級C、Dでは、覆工コンクリートを高強度繊維補強コンクリートで施工することとなっている。

当工事においては、この高強度繊維補強覆工コンクリートを打設するにあたり、規定されている生コン性状、打設時間および硬化後のコンクリート性状を満足させるために、配合設計から生コンの打設方法までを検討し、現在施工中である。本論文では、特に、鋼繊維を混入することにより、生コン性状が変化することに対する問題点と対応策を述べる。そして、高品質なコンクリートを

構築するための全断面スライドセントルの設計から打設方法までの検討事項、品質管理項目およびその実績について報告するものである。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

工 事 名 第二名神高速道路栗東トンネル上り線西（その2）工事

発 注 者 日本道路公団 関西支社

施 工 者 西松・清水・奥村共同企業体

工 期 平成11年2月26日～平成14年3月11日

工事数量

本坑拡幅工事：L=2636.4m、掘削断面積155m²（TBM先進導坑19.6m²を除く）

避難連絡坑 ：3箇所、L=64.6m、掘削断面積10.2m²

覆工コンクリート：アーチ 40,198m³

インバート 25,237m³

栗東トンネルは図-1に示すように琵琶湖の南端から東南東へ約10kmの滋賀県栗太郡栗東町に位置し、湖南アルプスといわれる山岳地帯を通過する延長3.8kmの長大トンネルである。一車線当たり3.75mの3車線、路肩2.5mを確保した最大掘削幅約18m、縦横比65%の扁平な大断面トンネルとなっている。トンネルの標準断面図を図

* 関西（支）栗東トンネル（出）

一2に示す。

当工事は、この様な扁平大断面トンネルを安全かつ迅速に施工するため、TBMによる先進導坑を施工した後、上半先進のNATMにより本坑断面に拡幅することとしている（写真一）。

2-2 地質概要

トンネル周辺は標高300m~600mの山地部で、山頂部は比較的なだらかな斜面がみられるが、沢や河川沿いは急峻なV字谷が発達している。トンネルの地質は、田上花崗岩といわれる白亜紀後期の粗粒黒雲母花崗岩で、一軸圧縮強度が最大100MPa、弾性波速度4.7km/s以上の新鮮で硬質な花崗岩で構成されている。しかし、小規模な断層・破碎帯が多く分布し、不連続面も発達している。地質縦断面図を図一3に示す。

§ 3. 配合設計

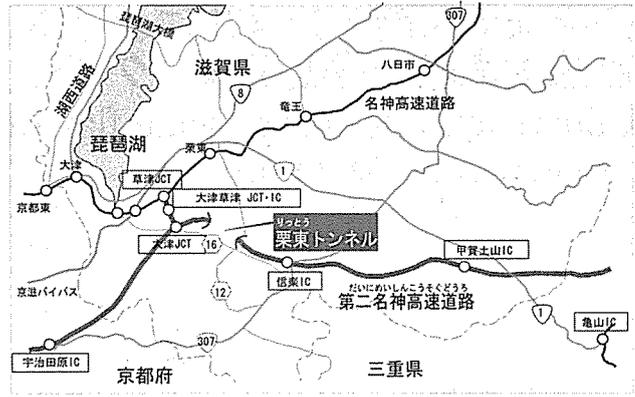
3-1 配合設計基準

扁平大断面トンネルの覆工は、現行2車線トンネルと同様に、通常、地山が安定してから覆工を施工するため、覆工の力学的検討は不要である。しかし、永くトンネルの安定を保ち、変形、剥落などを起こさず耐久性のあるものでなければならない。

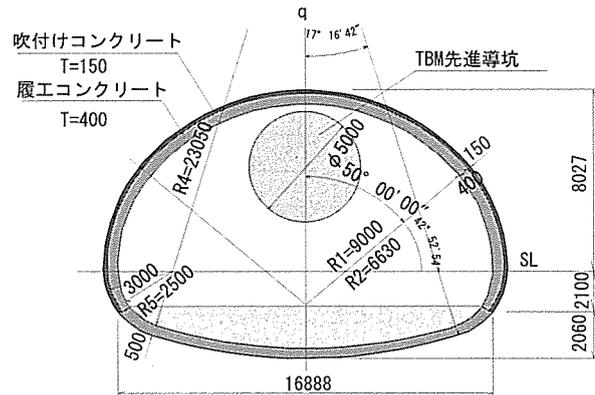
「日本道路公団、鋼繊維補強覆工コンクリート施工管理基準」に定められている配合決定のための基準を表一1に、示方配合と鋼繊維混入率を決定するための試験手順を図一4に示す。図に示すように、鋼繊維混入前（以下ベースコンクリートと称す）と混入後の各々について、生コン性状、硬化後のコンクリート強度について所定の管理基準値を満足させた後、実際にアジテータ車に鋼繊維を投入し攪拌する実機試験で、投入方法・時間、攪拌時間等を決定しなければならない。また、鋼繊維を混入させる目的である靱性強度を確認するために、曲げ靱性試験も行わなければならない。

3-2 事前検討

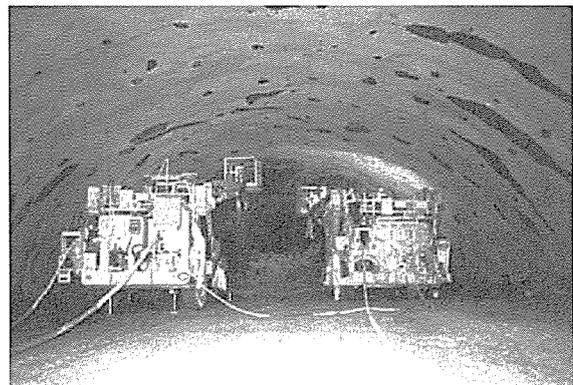
ベースコンクリートに鋼繊維を混入した場合、ガサツ



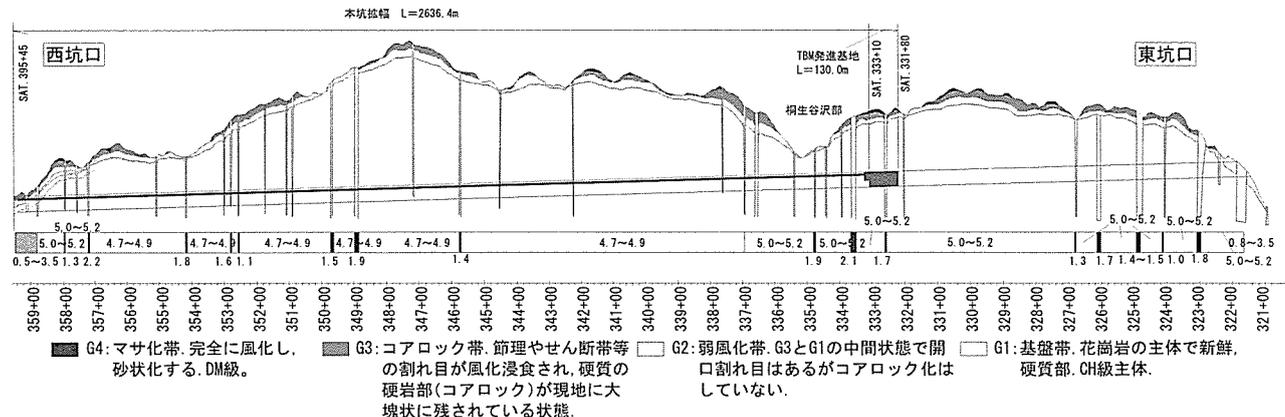
図一1 トンネル位置図



図二 トンネル標準断面



写真一 本坑半施工状況

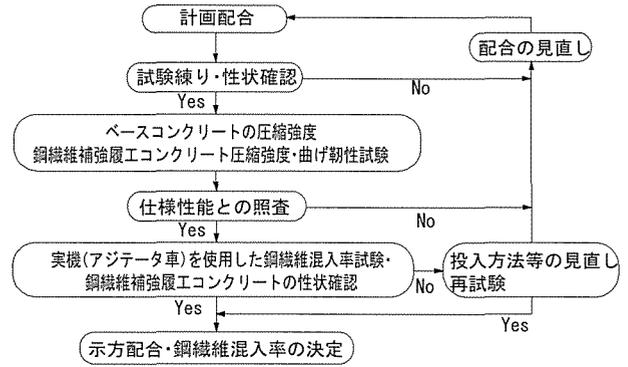


図三 トンネル地質縦断面図

表一 配合設定のための基準

種別	材齢28日における圧縮強度(N/mm ²)	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ ^{注1,2)} (cm)	空気量 ^{注2)} (%)	セメントの種類	最低セメント量(kg/m ³)	単位水量(kg/m ³)	鋼繊維混入率 ^{注3)} (%)	材齢28日における曲げ靱性	最大塩化含有量(CL)(g/m ³)
T2-2	30	20 25	15 (19) ^{注4)}	4.5 (4.5) ^{注4)}	普通ポルトランドセメント	-----	175以下	0.5以上	荷重・たわみ線を下回らないこと	300

【上段：鋼繊維補強覆工コンクリート（ファイバー混入後）、下段：ベースコンクリート（ファイバー混入前）】
 注1) コンクリートの打込み箇所における値。
 注2) スランプの許容値は・2.5cm、空気量の許容差は・
 注3) コンクリート体積比で配合上は外割りとする。
 注4) 標準的な値



図一 試験手順

表二 鋼繊維比較検討

項目	神鋼建材 シンコーファイバー		プリジストン タフグリップ		ベカルトアジア ドラミックス	
	スランプ(cm)	空気量(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
1. ファイバーの規格	50mm + 30mm		60mm + 30mm		50mm	
・ファイバー寸法	50mm + 30mm		60mm + 30mm		50mm	
・ブレンド比率	1:1		1:1		1:1	
・ファイバー姿	バラ		のり付け		バラ	
・ファイバー形状						
2. m ³ 当たりの混入量 (kg)	40		40		40	
3. 試験練り結果						
・ベースコンクリート	21.5 ○	5.1 ○	21.5 ○	5.2 ○	21.5 ○	5.0 ○
・ファイバーコンクリート練混後	18.0 ×	5.2 ○	17.0 ○	4.8 ○	18.5 ×	5.6 ○
・ファイバーコンクリート練混60分後	16.5 ○	9.8 ×	18.5 ×	13.0 ×	16.0 ○	10.0 ×
(速乾30分+待ち時間30分)	○：規定値内、×：規定値外					
4. ファイバー投入後の変化						
・空気量 (投入直後)	あまり変わらず		やや小さくなる		やや大きくなる	
・空気量 (投入60分後)	著しく大きくなる		著しく大きくなる		著しく大きくなる	
・スランプ (投入直後)	やや小さくなる		やや小さくなる		やや小さくなる	
・スランプ (投入60分後)	やや小さくなる		やや大きくなる		やや小さくなる	
・ファイバーボールの出来易さ	出来やすい		出来にくい		出来やすい	
5. ファイバー投入後の所見						
・投入直後	スランプは3.5~4.5cm小さくなり、空気量はやや大きくなる					
・投入60分後	空気量は著しく大きくなる。スランプはバラタイプでやや小さくなり、のり付けタイプはやや大きくなる。					
6. 総合所見	練上がり直後は、スランプ変化は小さいが、ファイバーボールが出来易く、強度の低下が考えられる。		のり付けタイプであるためスランプが安定しにくい、ファイバーボールが出来にくく、強度も安定している。		練上がり直後は、スランプ変化は小さいが、ファイバーボールが出来易く、強度の低下が考えられる。	

※工場で鋼繊維を投入するものと仮定

いたコンクリートとなり極端に流動性が落ちる。この状態でコンクリートを打設した場合、十分な締固めを行わない限り密実なコンクリートが得られない。特に、締固め作業が困難である天端に打設口（吹き上げ）を切り替えた後が問題となる。したがって、下記の点に留意することとした。

- ①鋼繊維を混入することにより、単位水量を増すことになるが、規定により175kg/m³以下に押さえなければならないため、高性能AE減水剤を使用して、単位水量を減らす。
- ②コンクリートのガサつきを解消し、流動性を増すために細骨材率 (s/a) を高めに設定する。
- ③鋼繊維の種類によって、生コン性状が異なるため、試験練りの前に各種鋼繊維を使用して前練りを行い、使用する鋼繊維を決定する。

現在、市販されている鋼繊維は、姿・形状が多様多様であり、スランプ、空気量等、生コンに与える影響も様々である。そこで、当現場で使用する生コンに適合した鋼繊維を決定するために、代表的な3種類の鋼繊維を用いて前練りを行った。比較検討を行った結果を表二に示す。ベースコンクリートに鋼繊維を混入することにより、3種類ともに同程度スランプが小さくなるが、60分間練混ぜた後の状態の比較をすると、のり付けタイプはバラ

表三 生コン使用材料

材料種別	品質特性	採取地と製造業者	比重	備考
セメント	普通ポルトランド	住友大阪セメント(株)	3.15	
細骨材	砂 (山砂)	大津市上田上産	2.56	粗粒率：2.74
粗骨材	碎石 (2005)	大津市上田上産	2.66	粗粒率：6.65
	碎石 (4005)	大津市上田上産	2.66	
混和剤	高性能AE減水剤	花王マイティー3000S	1.05	標準型 (I種)
混和材	鋼繊維	プリジストン(タフグリップ)		
水	工場内			

タイプに比べて空気量が増大し、スランプも大きくなる傾向にある。また、のり付けタイプは、ファイバーボールが出来にくいことが判明した。したがって、スランプ、空気量の問題に対しては、鋼繊維混入後から打設までの時間等を実機試験で適切に決めるものとし、ファイバーボール等の問題が少ないタフグリップを使用するものとした。

3-3 試験練り

(1)使用材料

試験練りに使用した材料を表三に示す。

(2)試験練り結果

前練りの結果を参考に、目標スランプと目標空気量を

下記のように設定した。

現場 運搬ロス SFロス
 目標スランプ 20cm = 15.0 + 1.0 + 4.0cm
 目標空気量 5.0% = 2.5 + 0.5 + 2.0%
 なお、運搬ロスは、運搬時間20分（距離8km）、SFロスは、鋼繊維を混入することによるロスである。

まず、暫定計画配合と細骨材率（s/a）を±3%変化させた配合でコンクリートを練り、最適細骨材率を決定した。その後、水セメント比（W/C）を±3%変化させた配合でスランプ、空気量等を確認した。次に、この3種類の生コンに鋼繊維を混入し、再度、スランプ、空気量等を確認し、材齢28日での圧縮強度および曲げ靱性試験を行った。生コン性状および強度データを総合的に判断した結果、仮配合を表-4のように決定した。曲げ靱性試験の結果を図-5に示す。各供試体4個ともに曲げ靱性強度が基準線を下回らずに良好な結果が得られた。ここで、鋼繊維混入後の練混ぜ時間は、90秒と設定した。

生コンの受入れ順序は、まず、生コンプラント工場にてベースコンクリートを練混ぜ、トラックミキサー車で現場まで運搬する。次に、ベースコンクリートのスランプ、エアertestを行い、合格したものについて鋼繊維をトラックミキサー車に投入し、高速回転して再度練混ぜ、最後にもう一度、スランプ、エアertestを行ってから打設する手順となる。

そこで、実際のプラント、トラックミキサー車を使用して、所定の生コン性状を満足させるための鋼繊維の投入時間、高速回転時間を確認するために、実機試験を行った。試験の結果、鋼繊維投入時間は、4.5m³当たり180kgで3分、トラックミキサー車高速回転による練混ぜ時間を90秒とし、表-4に示す配合を示方配合と決定した。試験により決定した鋼繊維投入フローを図-6に示す。

表-4 示方配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg)					
		セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維	混和剤
47	52.6	362	170	904	844	40*	5.068

*鋼繊維は外割とする

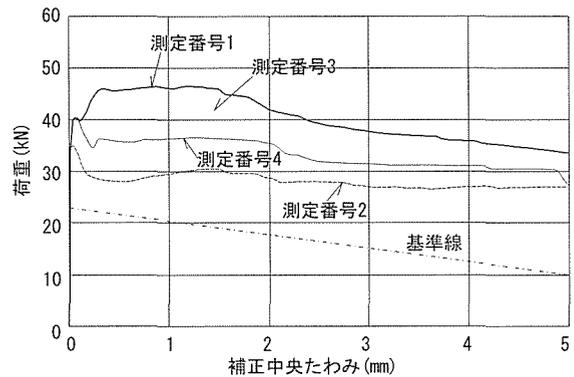


図-5 曲げ靱性試験結果

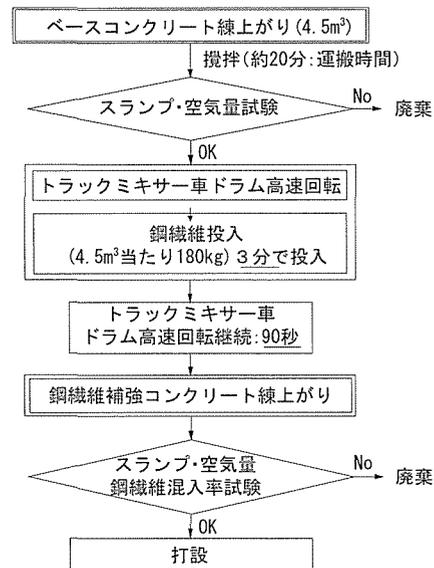


図-6 鋼繊維投入フロー

§ 4. 全断面スライドセントルの設計

4-1 セントルの長さ

覆工の進行を早めるためにはセントルは長い方が有利である。しかし、当トンネルの設計巻厚は40cmと薄いことから、セントルを長くするほどコンクリートの温度収縮、乾燥収縮によるひび割れが発生しやすい。また、吹き上げ方式でコンクリートを打設する場合、最後の天端部打設時にコンクリート圧送による圧力がセントルに直接作用し、セントルが変形することも考えられる。以上のことよりセントルの長さは標準的な10.5mとした。

4-2 検査窓

検査窓は、セントル据付後の表面の清掃や打設、締め固め作業、打設状況の確認などのために適切な位置に適数設ける必要がある。従来は、2スパン（1スパン：1.5m）毎に設けている例が多いが、当トンネルでは、締め固め作業の効率化を図るため各スパンに設けた。配置は、1

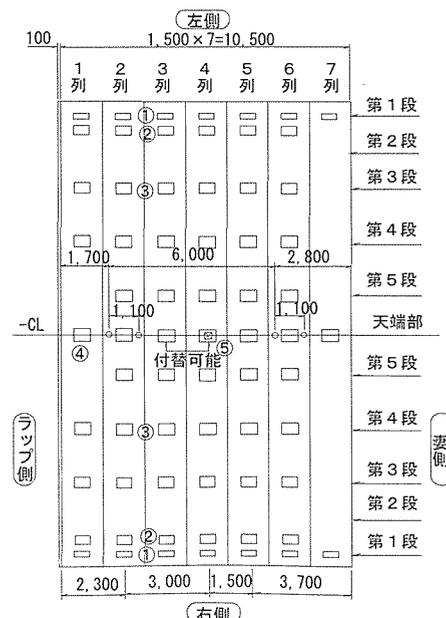


図-7 検査窓配置図

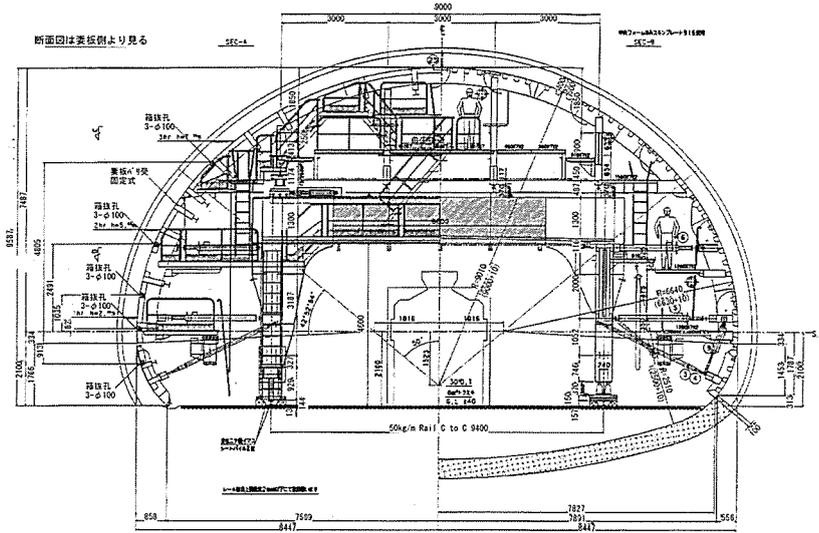


図-8 セントル断面図

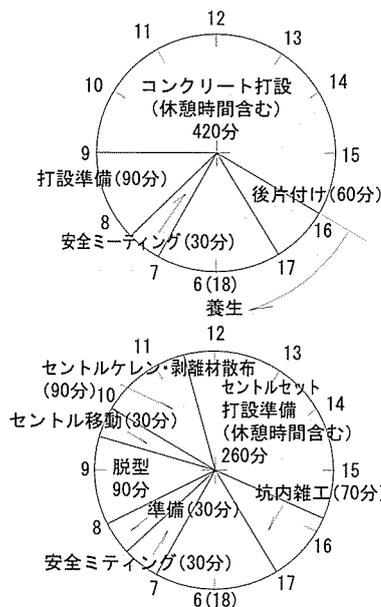


図-9 施工サイクル

スパン当たり左右各々5箇所天端1箇所の計11箇所である。

検査窓の大きさは、少なくとも作業のために人間が通れる程度の大きさ(45cm×45cm)が必要である。ここでは、少しでも活動しやすくように縦45cm、横55cmとした。

検査窓配置図およびセントル断面図を図-7, 8に示す。

4-3 専用締固めバイブレータ

締固め作業の効率化を図るため、棒状高周波バイブレータ(フレーキ径40mm)を各打設口に3本、計21本配置した。打設口は、左右に各々3箇所(SL付近に1箇所、肩部に2箇所)と天端部に設けた。各々の打設口に専用のバイブレータを配置しているため、従来の方法に比べて大幅な締固め作業の効率化が図れる。

4-4 セントル清掃作業の合理化

セントル表面の清掃作業は、作業空間が狭く足場が確保できない等のトンネル特有の問題が有り、十分な清掃作業が困難な場合が多い。したがって、清掃作業を容易にするために、表面にセラミック処理を施し、更に自動ケレン装置を使用して問題の解決にあたった。

4-5 剥離材の塗布

セントル表面の状態は、コンクリート表面の平滑性、見栄え等に大きく影響する。このため、コンクリートがセントルに付着するのを防ぎ、脱型を容易にするため、表面に剥離材を塗布した。しかし、過度の塗布は、コンクリート表面に色むらや縞模様を生じさせ見栄えが悪くなる。したがって、塗布に当たっては慎重にむらなく行う必要があるため、自動噴霧装置(自動ケレン装置とセット)を装備することとした。なお、塗布の目安は12~15m²/ℓとした。

§ 5. 施工方法

5-1 施工サイクル

覆工コンクリートは、坑口部を除き、2日に1回の打設サイクルとした。当トンネルにおける施工サイクルを図-9に示す。

5-2 打設方法

コンクリートは、図-7に示す①~⑤の順に打設した。ポンプ車にて生コンを圧送し、打設口の最下部からセントルに偏圧がかからないように左右均等に打設し、左右の高さの差が1m以上にならないように管理した。また、SLから下については、空気アバタが残りやすいためバイブレータにて十分な締固めを行いながら、検査窓下付近まで圧送した。吹き上げ孔からの最後の打設についても天端検査窓からバイブレータにて十分に締固めを行い、空隙が残らないように妻板の隙間からモルタルが流出するのを確認しながら慎重に打設した。

5-3 養生

トンネル坑内の温度は1年を通じて比較的安定しているため、基本的に養生は自然養生とした。しかし、冬季には坑内温度が10℃以下になることも予想されるため、その場合には、シートおよびジェットヒータによる保温養生を行うこととした。

5-4 脱型

セントルは、少なくともコンクリートの自重に耐える強度に達するまでは取り外してはならないとされている。そこで、コンクリートの自重を荷重とした骨組構造解析と弱材齢時の強度試験を行った結果、自重に耐えるには一軸圧縮強度が3.2N/mm²を満足しなければならず、

表一五 主な品質管理項目

試験項目	適用	試験頻度	規定値
スランブ	ベース	1) 最初の連続5台、以後50m ³ ごと	19±2.5cm
	鋼繊維入り	2) 強度試験用供試体作成時	15±2.5cm
空気量	ベース	1) 最初の1台、以後50m ³ 2) 強度試験用供試体作成時	2.5±1.5%
	鋼繊維入り		4.5±1.5%
温度	ベース 鋼繊維入り		10~30℃
塩化物含有量	ベース	週に1回	300 (g/m ³)
	鋼繊維入り		
繊維混入率試験	鋼繊維入り	1スパンに1回 (1台目に採取)	混入率の70%かつ5スパン毎の平均値が混入率の95%以上
圧縮強度	ベース	最初の1台以後150m ³ 毎に1回	28日強度で30N/mm ² 以上
	鋼繊維入り		
曲げ靱性試験	鋼繊維入り		曲げ靱性曲線が荷重-たわみ線を下回らない

表一六 打設数量管理

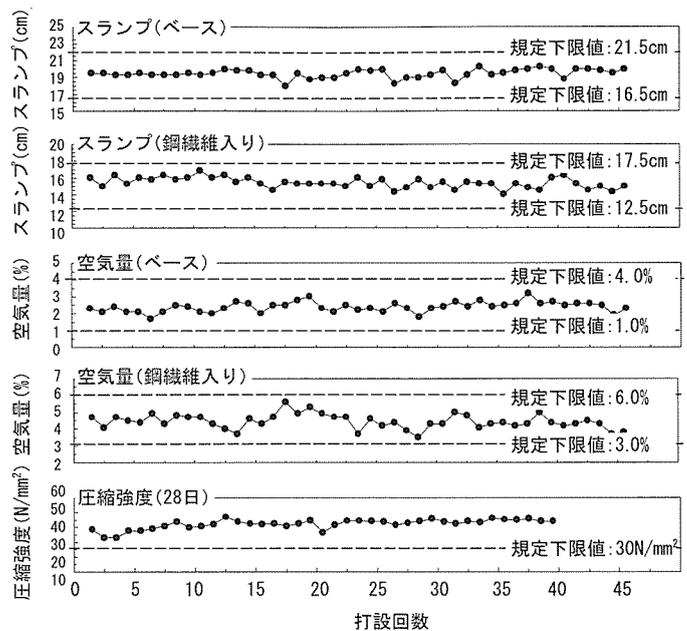
支保パターン	余巻きの管理目標値 %	コンクリート			
		進行 m	設計 m ³	実績 m ³	余巻率 %
B	150	0.0			
CI-1	140	112.0	1,344.1	1,958.4	146
CII-1	115	310.1	3,721.5	4,187.9	113
CII-2	115	50.4	604.9	666.7	110
DI-1	110	0.0			
DIII	110	0.0			
累計		472.5	5,670.5	6,813.0	120

最小限16時間の養生が必要であることがわかった。したがって、打設終了後、16時間後に脱型することとした。しかし、冬季期間においては、坑内温度が下がるため、強度 (3.2N/mm²) を満足するのに養生時間を長くとらなければならない。2日に1回の打設ペースを確保するために、シートおよびジェットヒータによる保温養生をするものとした。

§ 5. 施工実績

5-1 品質管理

日本道路公団が定めている高強度鋼繊維補強コンクリートの主な品質管理項目を表一五に示す。この管理項目を適用しながらこれまでに述べた施工手順をもとに、平成12年12月末までに45回のコンクリート打設を完了した。主な品質管理試験結果を図一十に示す。鋼繊維を投入したため、攪拌後の空気量に若干変動があるものの、フレッシュコンクリート性状および硬化コンクリートの性状ともに全て規格値を満足し、変動の少ない均一なコンクリートが打設できていることがわかる。また、打設後のコンクリート表面は、打設むら、縞模様、あばた等が少なく非常に綺麗である。これは、現場までの運搬時間が短く、安定した供給能力をもつ生コンプラントの選定と、打設のしやすさを考慮した配合設計、セントルの構造・設備および厳しい工程であるにも関わらず「高品質なコンクリート構造物を作ろう」という作業員の気持ち



図一十 品質管理試験結果

質なコンクリート構造物を作ろう」という作業員の気持ち

5-2 打設数量管理

表一六に各支保パターンにおける余巻き率の管理目標値と打設実績を示す。鋼アーチ支保工のない、CI-1では、管理目標値を若干上回っているが、その他のパターンにおいては下回っており、合計で約120%の余巻き率である。高強度鋼繊維補強コンクリートの1m³当たりの単価が非常に高いため、極力、余巻きを小さくしなければならない。したがって、現在、上半掘削時に、断面測定を行い掘削断面管理を行うことで、余掘を抑えて、コンクリート打設数量を極力低減するようにしている。今後も、掘削断面管理を引き続き行い、全てのパターンにおいて管理目標値を下回るよう努力する予定である。

§ 6. おわりに

現在、2日に1回の打設ペースで順調に覆工コンクリートを打設している。特に、コンクリート表面の出来映えについては、社内・外において評判が良い。今後も、最終打設まで、上記に述べた打設手順、方法を遵守し、各種品質管理試験を行い、高品質な覆工コンクリートを施工する予定である。

最後に、本工事を行うにあたり、適切なお助言、ご指導を頂いた関係各位に感謝の意を表するものである。