

長期耐久性を向上させるための覆工コンクリートの配合検討

Examination of Mixing for Improvement of Long-Term Durability of Tunnel Concrete

宇野洋志城¹・歌川紀之²・小泉直人³

Yoshiki Uno, Noriyuki Utagawa and Naoto Koizumi

¹正会員 佐藤工業 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

E-mail:uno@satokogyo.co.jp

²正会員 佐藤工業 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)

E-mail:utagawa@satokogyo.co.jp

³正会員 佐藤工業 土木事業本部 技術部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-19)

E-mail:koizumi@satokogyo.co.jp

The purpose of this study is to show the long-term durability of tunnel lining concrete. The utilization of fiber reinforced concrete is to prevent that concrete blocks come off from ceiling of tunnel lining recently. Materials of mixture are not steel fibers but synthetic fibers. These functions are effective in keeping tough when bending by load, and the mixing rate of fiber is 0.3 % on the base of volume usually. An examination on physical properties is carried out in case of some mix proportions, by use of fly ash or lime stone and so on. As a result, these kinds of fiber reinforced concrete have sufficiently some possibilities of application to tunnel lining. And it is clear that mixing rate of fiber has a great influence on flexural toughness more than concrete strength and kinds of fiber.

Key Words : fiber, tunnel lining, flexural toughness, mixing rate, durability

1. はじめに

最近の道路トンネルや鉄道トンネルでは、運用開始後におけるコンクリート塊の剥離や剥落から通行する車や鉄道の安全を守ることが重要とされている。そのため、維持管理時には目視検査や打音検査により剥離や剥落が発生しそうな箇所を未然に発見し、補修あるいは補強の対策が取られている。

また、高速道路の大断面トンネルを中心に覆工コンクリートに繊維を混入させ、曲げ靱性を向上させることにより建設当初から剥離、剥落の防止を目的としたトンネル覆工の品質向上を図る事例が増えており、関連した技術に関する研究報告¹⁾²⁾も散見される。

本報告では、トンネル覆工の長期耐久性の向上を目的に非鋼繊維を用いることにより剥離、剥落を防止する性能を有する配合 (NEXCO 標準仕様) に加えて、フライア

ッシュや石灰石微粉末の使用により施工性と充てん性を向上させるとともに温度ひび割れ等の発生を抑制した配合に関して、それらの強度特性を検証した。

2. 試験概要

本試験では、使用実績のある3種類の非鋼繊維 (PP: ポリプロピレン, PVA: ポリビニルアルコール/ビニロン, PET: ポリエチレンテレフタレート) を用いた。

その混入率はNEXCO 標準仕様の0.3%以外にもコスト低減の可能性を求めたケースとして混入率 0.2%も設定した。

ベース配合は3種類 (『NEXCO 標準配合』, 『低発熱配合』, 『高流動配合』) とし、繊維3種類×混入率2水準×ベース配合3種類の計18ケース+ベース配合3ケースに

表-1 各繊維の物理的性質（*は混入率0.3%の場合の数値）

繊維種類	素材	繊維長 (mm)	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	質量 (mg)	密度 (g/cm ³)	付着強度 (N/本)	引張強度 (N/本)	引張抵抗力* (kN/m ²)	繊維本数* (本/m ³)
PP	ポリプロピレン	48	0.90 (幅) 0.50 (厚)	0.385	16.82	0.91	217.5	204.2	33 143	162 307
PVA	ポリビニール アルコール樹脂	42	0.66	0.342	18.67	1.30	151.4	296.5	31 630	208 891
PET	ポリエチレン テレフタレート	40	0.70	0.400	21.12	1.32	164	209.6	30 754	187 500

表-2 示方配合

ベース配合	Gmax (mm)	W/Cw (%)	W/Pw (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
						W	C	FA	LS	P	S	G	Ad
NEXCO 標準	20	51.5	51.5	4.5	52.0	175	340	0	0	340	888	838	P×0.8%
低発熱	20	59.9	51.5	4.5	52.0	175	292	48	0	340	883	830	P×0.7%
高流動	20	54.9	35.0	4.5	60.0	175	319	0	181	500	934	634	P×1.0%

ただし、C：高炉セメントB種、密度3.04 g/cm³、比表面積3780 cm²/g

FA：フライアッシュⅡ種、密度2.28 g/cm³、比表面積4100 cm²/g

LS：石灰石微粉末、密度2.71 g/cm³、比表面積4730 cm²/g、P：結合材=C+FA+LS

S：厚木市飯山華嚴産砂岩系砕砂、表乾密度2.56 g/cm³、吸水率2.5%、粗粒率2.90

G：厚木市飯山華嚴産砂岩系砕石、表乾密度2.61 g/cm³、吸水率2.5%、粗粒率6.77、実積率58.1%

Ad：高性能AE減水剤、主成分：ポリカルボン酸エーテル系、密度1.07 g/cm³

ついて、それぞれスランプや空気量などのフレッシュ性試験および硬化後の曲げ靱性試験等を実施した。

(1) 繊維の特徴

使用した繊維の特徴を整理し、物理的性質を表-1に示す。

各繊維は形状（長さ、断面積）が異なり、密度に関してはPPが他2種類の繊維と差があり、その数値が最も小さい。また、強度特性のうち付着強度に関してはPPが他2種類の繊維と差があり、その数値が最も大きく、引張強度に関してはPVAが他2種類の繊維と差があり、その数値が最も大きい。それらに対し、PETは密度と付着強度に関してはPVAと同等、引張強度に関してはPPと同等である。

各繊維の抵抗力は、理論上繊維1本あたりの付着強度と引張強度からハッチ部分の強度で決定する。表中の数値から、理想的に繊維の中心部分に破壊面が存在する場合にPPは引張強度が限界に達して「切断」で破壊し、PVAおよびPETは付着強度が限界に達して「抜け」で破壊することが予想される。

繊維混入率を考慮して1m³あたりの引張抵抗力に換算すると、PPは引張強度が小さいために繊維長により付着強度を大きくして3種類の繊維で最も大きな数値とする一方で、PVAは1本当たりの付着強度が小さい分を本数で補っていることがわかる。

(2) ベース配合

a) 配合条件

配合設計するにあたり、NEXCOの繊維補強覆工コンクリート（T3-1）の基準³⁾および一般のトンネル等を参考に設定した配合条件を以下に示す。

- ・ 空気量：4.5±1.5%
- ・ 単位セメント量：270 kg/m³以上
- ・ 単位水量：175 kg/m³以下
- ・ 水結合材比：55%以下
- ・ 繊維混入時のスランプ：15 cm±2.5 cm

b) 配合種類

ベース配合3種類の示方配合を表-2に示す。

空気量は4.5%、単位水量は175 kg/m³共通とし、比較対象とする『NEXCO標準配合』は単位セメント量340 kg/m³

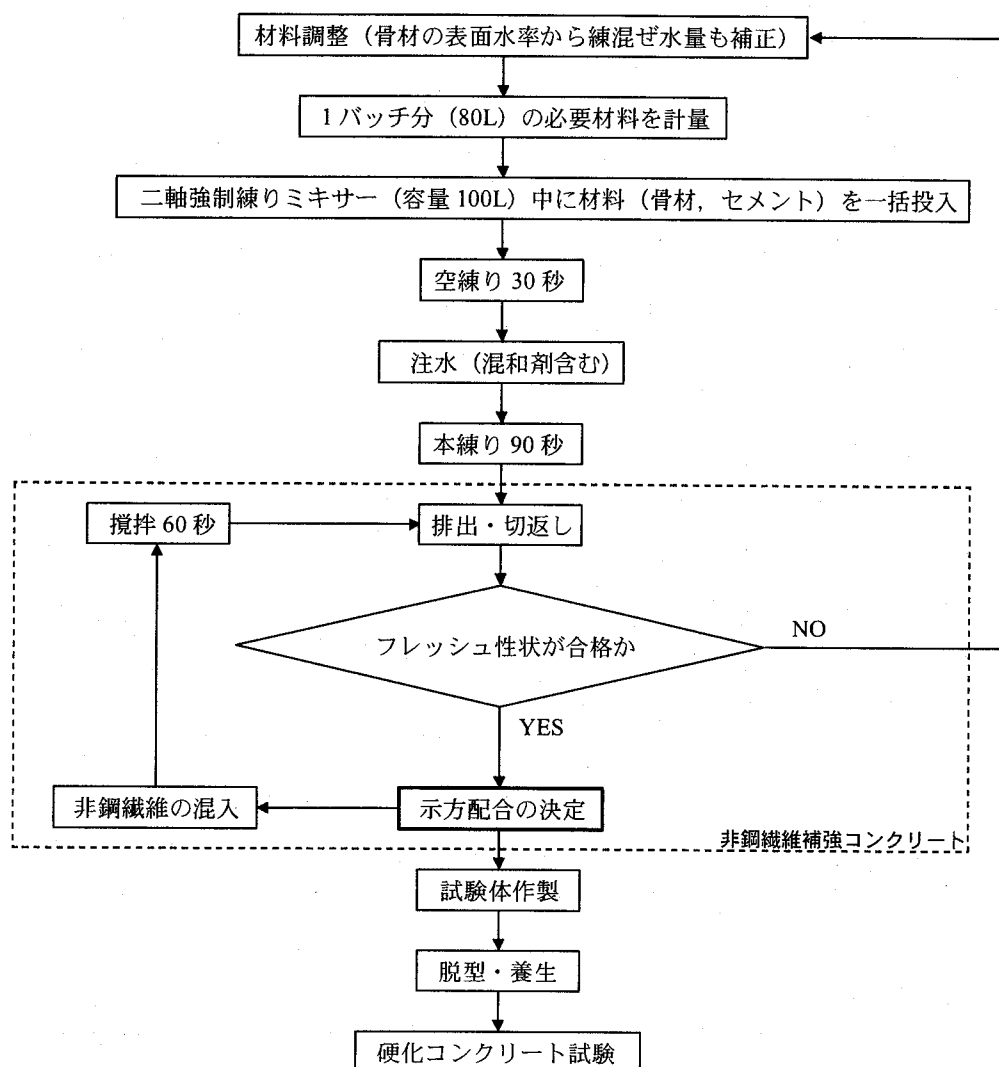


図-1 非鋼繊維補強コンクリートの作り方および試験の手順

とした。

一方、フライアッシュを使用した配合は総結合材量 340kg/m^3 のまま水セメント比が 60%を上回らないようにセメントの一部をフライアッシュで置き換え、『NEXCO 標準配合』に比べて発熱量を抑えた配合なので『低発熱配合』と称した。

また、石灰石微粉末を使用した配合は総結合材量を 500kg/m^3 、水結合材比を 35%としたが、必要以上の強度発現を抑えるために水セメント比が 55%程度となるように単位セメント量を調整した。その結果、石灰石微粉末を多く混入させて高流動コンクリートの領域までその変形性（流動性）と材料分離抵抗性を高めた配合なので『高流動配合』と称した。

(3) 試験方法

非鋼繊維補強コンクリートの作り方および試験の手順を図-1に示す。

フレッシュコンクリートの試験に関しては、ベース配合が『NEXCO 標準配合』と『低発熱配合』であるケースは JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」、ベース配合が『高流動配合』であるケースは JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠した。空気量に関してはベース配合に関係なく JIS A 1128「コンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠し、硬化コンクリート試験に関しては、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」、JSH 730-2003「繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法」に準拠した。なお、曲げ靱性試験後にはひび割れ面の繊維を確認し、有効本数を調査した。

表-3 試験結果一覧

配合	物性値	ベース	PP 0.2%	PP 0.3%	PVA 0.2%	PVA 0.3%	PET 0.2%	PET 0.3%
NEXCO標準	スランプ (cm)	19.0	13.0	12.5	16.0	16.0	17.5	17.5
	空気量 (%)	3.2	3.2	3.8	3.0	3.2	4.2	3.7
	練上り温度 (°C)	16.5	18.0	18.5	19.0	17.5	19.5	19.0
	圧縮強度 (N/mm ²)	43.9	52.9	50.5	49.1	47.8	47.9	50.0
	曲げ強度 (N/mm ²)	4.97	3.99	4.21	5.38	3.87	5.62	3.62
	曲げ靱性 (N/mm ²)	—	1.33	2.18	1.13	1.79	1.00	1.31
	繊維本数 引張/有効	—	27/46	41/81	44/90	51/98	43/78	45/87
低発熱	スランプ (cm)	20.5	17.0	17.0	14.5	15.5	16.0	17.5
	空気量 (%)	3.1	3.4	3.5	3.3	3.5	3.3	3.9
	練上り温度 (°C)	17.5	19.0	19.0	18.5	19.0	17.0	17.0
	圧縮強度 (N/mm ²)	36.1	42.3	39.9	41.7	40.3	39.8	42.2
	曲げ強度 (N/mm ²)	4.45	3.98	3.59	3.44	3.67	3.63	3.54
	曲げ靱性 (N/mm ²)	—	1.15	1.88	1.17	1.82	1.11	1.34
	繊維本数 引張/有効	—	30/55	54/92	43/81	63/122	27/55	43/85
高流動	スランプ (cm)	60.0×60.0	57.0×55.0	57.0×57.0	60.0×56.0	52.0×50.0	62.0×60.0	57.0×55.0
	空気量 (%)	3.1	3.6	4.2	3.5	3.0	3.9	4.6
	練上り温度 (°C)	18.0	19.0	19.0	18.5	18.0	16.5	16.5
	圧縮強度 (N/mm ²)	58.4	61.8	62.4	60.3	61.7	60.6	60.6
	曲げ強度 (N/mm ²)	5.89	4.47	4.86	4.66	4.67	4.64	4.42
	曲げ靱性 (N/mm ²)	—	1.39	1.67	1.17	1.87	1.25	1.75
	繊維本数 引張/有効	—	40/70	48/95	38/73	70/133	27/60	49/96

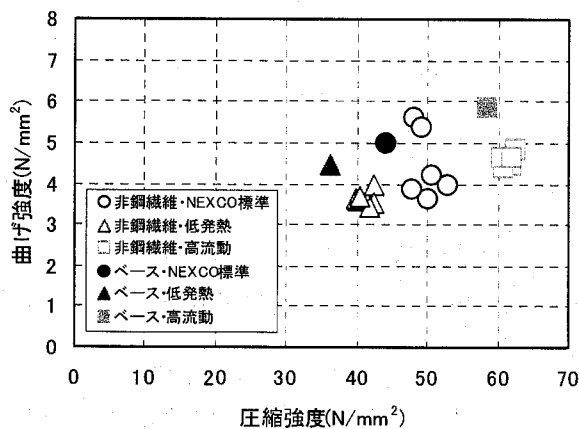


図-2 圧縮強度と曲げ強度との関係

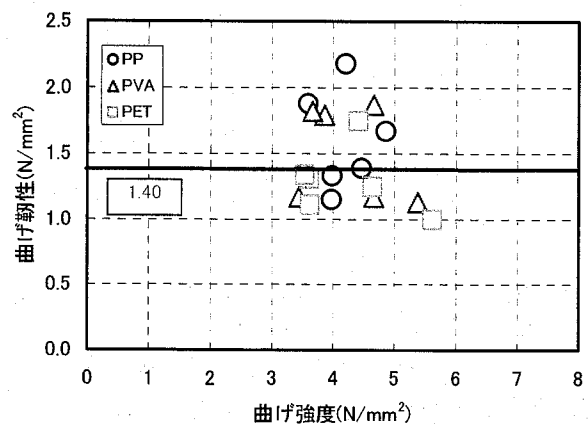


図-3 曲げ強度と曲げ靱性との関係 (繊維別)

3. 試験結果

(1) フレッシュ性状

ベース配合を含めた試験結果を表-3に示す。

『NEXCO標準配合』および『低発熱配合』では、全ての配合で空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ と非鋼繊維混入時のスランプ

15cm $\pm$ 2.5cm の許容範囲を満足していることが確認できた。

『高流動配合』においても空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ と高流動コンクリートとしての範疇にあるスランプフロー50cm 以上程度を満足していることが確認できた。

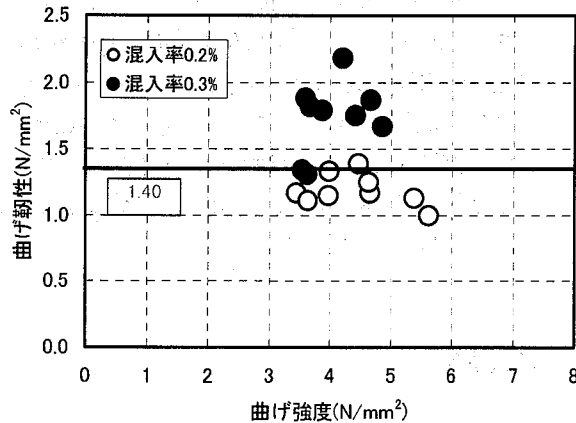


図-4 曲げ強度と曲げ靱性との関係（混入率別）

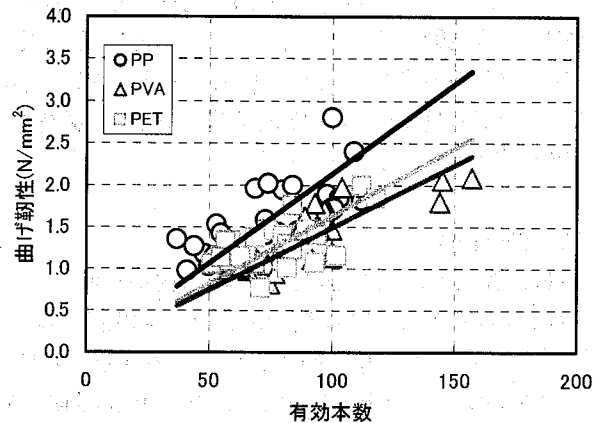


図-5 有効本数と曲げ靱性との関係（全試験体）

(2) 硬化後性状

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-2に示す。

圧縮強度に関してはベース配合の種類により強度発現領域が別れ、おおむね『低発熱配合』＜『NEXCO 標準配合』＜『高流動配合』の順番となった。

繊維混入前後の曲げ強度に関しては、『NEXCO 標準配合』の一部を除いて繊維混入した場合の方が小さくなった。各繊維メーカーのデータでは繊維混入による強度特性への影響はほとんどないとの報告を受けたが、今回の試験結果には若干小さくなる傾向が認められた。

また、『低発熱配合』ではセメントの一部をフライアッシュで置き換えて水セメント比が最も大きくなったので圧縮強度は低くなった。

一方で『高流動配合』では強度発現にあまり寄与しない石灰石微粉末を使用しているにもかかわらず最も強度が大きくなった理由には、微粉末効果により細孔組織が緻密化したことが考えられた。

繊維種類の違いによる曲げ強度と曲げ靱性との関係を図-3に示す。

この結果から、曲げ強度と曲げ靱性に相関関係は認められない。曲げ強度の最も大きかった『高流動配合』の場合でも曲げ靱性は最大を示すことはなく、曲げ靱性は曲げ強度以外に支配されているものと推測された。

PP と PVA を混入した場合には、繊維混入率が 0.3% であれば曲げ靱性は NEXCO の基準である 1.40N/mm^2 を満足しているが、PET を混入した場合には繊維混入率が 0.3% であっても曲げ靱性が 1.40N/mm^2 を満足しない場合が認められた。PET が最も曲げ靱性の向上に対して不利であることは表-1 中の引張抵抗力が示すとおりである。

一方、繊維混入率の違いによる曲げ強度と曲げ靱性との関係を図-4に示す。

この結果から、曲げ靱性に関しては繊維混入率が大き

く影響を及ぼしていることが明らかである。ただし、繊維混入率が 0.2% では曲げ靱性 1.40N/mm^2 を満足することは困難であり、そのためには少なくとも混入率は 0.3% 以上必要である。

さらに、曲げ靱性試験後に試験体をひび割れ面で分割した面に露出した繊維のうち、曲げ靱性に影響がある配置方向の繊維本数を有効本数として集計した。ただし、有効本数は切断と抜けの総数で示し、切断の本数については相対する面の多い切断本数を数えた。なお、PVA、PET では繊維の付着力不足で破壊する可能性が高く（切断は生じ難い）、外見上からも切断と抜けとの区別が付き難いため、両面の本数総てを有効本数とした。

有効本数と曲げ靱性との関係を図-5に示す。

これより、図中にプロットした全ての試験体の結果は設計基準線である 0.545N/mm^2 を満足しており、繊維種類にかかわらず有効本数が増加するに従って曲げ靱性が大きくなる傾向が認められる。繊維本数は PVA が PP、PET に比較して多いのは表-1 中の繊維本数と合致する。また、同一の有効本数における曲げ靱性の勾配（近似直線の傾き）は PVA、PET に比較して PP が大きい。これも表-1 の引張抵抗力と一致する。

したがって、曲げ靱性を向上させるには繊維種類にかかわらず繊維混入率を増加することが最も効果的であり、同一繊維混入率で得られる効果が最も期待できるのは PP であることが明らかである。

4. まとめ

(1) ベース配合

ベース配合にフライアッシュおよび石灰石微粉末を使用することによって、『NEXCO 標準配合』に比べて発熱

量を抑えた『低発熱タイプの配合』と高流動コンクリートの領域までその変形性（流動性）と材料分離抵抗性を高めた『高流動タイプの配合』について検証した結果、3種類の非鋼繊維を混入した各コンクリートにおいて使用するに十分な施工性と曲げ靱性を有することが確認でき、実用化が可能である。

(2) 曲げ靱性

曲げ靱性を向上させるには、今回の試験条件ではベース配合の強度あるいは繊維種類よりも非鋼繊維の混入率による影響が大きく、NEXCOの基準（曲げ靱性で 1.40N/mm^2 以上）を満足するには0.3%以上の繊維混入率が必要である。

(3) 繊維の種類

繊維混入率が0.3%であれば、繊維種類がPPとPVAの場合には3種類全てのベース配合でNEXCOの品質管理基準（曲げ靱性の平均が 1.40N/mm^2 以上）を満足するが、繊維種類がPETの場合には曲げ靱性が不足するケースがある。さらに、PETには再生利用という環境的な利用のメリットはあるが、施工性や作業性について優位性とはとくに認められない。

(4) 繊維の特徴

曲げ靱性は、ひび割れ面近傍にある繊維の数およびそ

の繊維の強度（引張強度、付着強度）に大きく影響を受ける。各繊維の特徴を比較すると、PPは引張強度が弱点であり、PVAおよびPETは付着強度が弱点である。1本当たりの引張抵抗力は順番に $\text{PP} > \text{PET} > \text{PVA}$ となるが、PVAは本数が多く混入しているため、同一繊維混入率における引張抵抗力の順番は $\text{PP} > \text{PVA} > \text{PET}$ である。

したがって、同一混入率で得られる効果が最も期待できるのはPPである。

参考文献

- 1) 馬場弘二、伊藤哲男、城間博通：覆工コンクリートのはく離・はく落抑制を目指した鋼繊維補強仕様の確立に関する研究、日本道路公団試験研究所報告、pp.91-108, Vol.39, 2002.11
- 2) 歌川紀之、宇野洋志城、小泉直人：非鋼繊維を混入したトンネル覆工コンクリートの品質向上に関する検討、北陸地方建設事業推進協議会 平成19年度建設技術報告会、2007.11（投稿中）
- 3) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領〔繊維補強覆工コンクリート編〕、2006.10