

変位未収束対策における繊維補強コンクリート 覆工の設計手法に関する検討

井浦 智実¹・丸山 修²・小島 芳之³・岡野 法之³・舟橋 孝仁³

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:t.iura@jr-tt.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

膨張性地山等の特殊地山では、長期間にわたり坑内変位が収束せず、覆工コンクリートの打設後に残留変位に伴う荷重が作用する場合がある。このような場合、トンネルに将来的に作用する荷重を想定し、覆工に力学的な機能を付加させる対応が実施されており、RC構造や繊維補強コンクリートによる補強が採用される。しかしながら、覆工補強の統一的な選定法や設計手法は確立されていないのが現状である。

一方、近年の整備新幹線トンネルでは、従来の鋼繊維に加え、発錆等の問題がない有機系材料である非鋼繊維を用いた覆工補強事例が増加している。そこで、本稿では、非鋼繊維、鋼繊維それぞれの耐荷特性について検討を行い、それらの差を考慮した段階的な設計手法を提案した。

Key Words : lining, squeezing ground, fiber reinforced concrete, flexural toughness, design method

1. はじめに

膨張性地山等の特殊地山を対象とする山岳トンネルにおいては、覆工コンクリートの打設前までに坑内変位が収束せず、その打設後に残留変位量に伴う荷重がトンネルに作用する場合がある。このような場合、覆工に将来的に作用する荷重を想定し、覆工に力学的な機能を付加する対応が実施されており、RC構造や繊維補強コンクリート（以降、FRCと称す）を採用することが一般的となっている^{たえはり〜9}。

近年では、整備新幹線トンネルの新設工事においてもFRCが採用される事例が増加している。これまで、変位未収束対策として覆工に力学的な機能を付加させる場合には、主に鋼繊維の採用が中心であったが、最近では、有機系のポリプロピレン等を材料とした非鋼繊維の採用事例が増加している。非鋼繊維は、トンネル完成後の発錆等の問題がなく、鋼繊維と比較し安価であるという特徴を有するが、その耐荷特性については不明な点が多く、覆工設計にその効果を反映する段階にまで至っていないのが現状である。そこで、筆者らは、その耐荷特性を模型実験や数値解析によって評価し、覆工補強への適用を拡大していくための検討を進めてきた^{7〜10}。一連の検討により、非鋼繊維については、鋼繊維ほどの補強効果はないものの、地圧に対して十分な耐荷性能を有するとい

う知見が得られており、非鋼繊維の耐荷特性を正しく評価し設計に反映させることによって、より合理的な覆工補強を実現できるものと考えられる。

本稿では、変位未収束区間の覆工補強にFRCを採用する場合を対象とし、整備新幹線トンネルの現場試験データをもとに、非鋼繊維、鋼繊維それぞれの耐荷特性を設計曲げ引張強度に着目して評価した。また、無筋、非鋼繊維、鋼繊維の耐荷特性を考慮した段階的な覆工の設計手法について検討を行った。

2. 曲げタフネス試験結果にもとづく設計曲げ引張強度の検討

ここでは、整備新幹線トンネルの建設現場における品質管理の一環として実施された曲げタフネス試験結果を用いて、鋼繊維および非鋼繊維の各繊維混入率に対応する標準的な曲げ引張強度の設定について検討を行う。

(1) 曲げタフネス試験結果の分析と適用データの抽出

検討に用いた繊維補強コンクリートの試験データサンプル数を表-1に示す。整備新幹線の3線区における総数163のデータを対象として分析を実施した。なお、データ収集時期は、2006年10月～2007年4月であり、その後

表-1 検討に用いた試験データサンプル数

繊維種別	線 区	工区数	サンプル数
鋼繊維	東北新幹線 (盛岡・新青森間)	7	22
	北陸新幹線 (長野・金沢間)	6	23
	九州新幹線 (新八代・鹿児島中央間)	5	101
	計		146
非鋼繊維	東北新幹線 (盛岡・新青森間)	5	14
	北陸新幹線 (長野・金沢間)	1	3
	計		17
		合 計	163

表-2 試験データサンプルの主な諸元

繊維種別	ベースコンクリートの 設計基準強度 (N/mm ²)	繊維混入率(体積比) (vol%)
鋼繊維	24～30	0.3～1.0
非鋼繊維	21～30	0.3～0.5

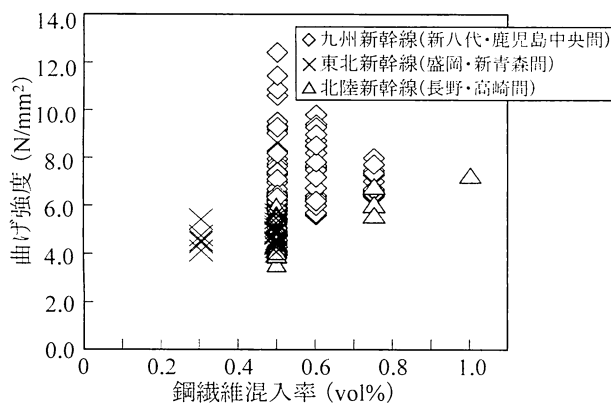


図-1 繊維混入率と曲げ強度の関係（鋼繊維）

の施工実績としては、非鋼繊維のデータがさらに増加している。また、試験データサンプルの主な諸元について表-2に示す。ベースコンクリートの設計基準強度は21～30N/mm²、繊維混入率（体積比）は0.3～1.0vol%となっており、標準的なFRCの実績の範囲内といえる。

鋼繊維を適用した現場における、繊維混入率と曲げ強度の関係を図-1に示す。これによると、九州新幹線の各トンネルにおける混入率0.5vol%の曲げ強度は、ばらつきが大きく、他に比べても1.5倍～2倍程度大きいことがわかる。これらのデータのすべてを適用して設計値を定めることは、設計値としての信憑性に欠けるため、工学的な判断により設計値を求めるためのデータを抽出することが必要であると考えられる。

鋼繊維混入率0.5vol%における各線区のトンネル現場毎の曲げ強度の実績を図-2に示す。九州新幹線において、曲げ強度が大きな値を示す要因を究明するため、コンクリート配合の観点から様々な分析を試みたが、明確な要因の把握には至らなかった。そのため、本検討においては、九州新幹線以外の曲げ強度の上限付近に閾値（曲げ

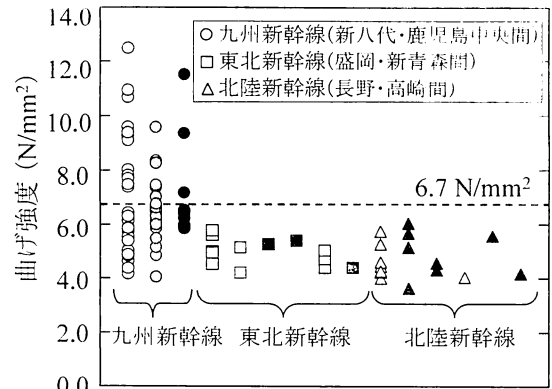


図-2 工区毎の曲げ強度（鋼繊維混入率0.5vol%）

強度6.7N/mm²（最大荷重 $P_{max}=50kN$ ））を定め、閾値以下のデータを適用することとした。また、鋼繊維混入率0.6vol%においては、図-1より九州新幹線以外の比較データが無いため、繊維混入率0.75vol%の曲げ強度の上限を参考に曲げ強度8.0N/mm²（最大荷重 $P_{max}=60kN$ ）以下のデータを適用することとした。

一方、非鋼繊維については、データのサンプル数が鋼繊維よりも少なく、曲げ強度のばらつきも小さかったため、すべてのデータを適用することとした。

(2) 曲げ引張強度の特性値 (f_{ft}) の算出

抽出した現場試験データを適用し、曲げタフネス試験における荷重-変位関係より、FRCの曲げ引張強度の算出を行った。曲げ引張強度の算出方法は、「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」¹¹⁾を参考とした。算出した鋼繊維および非鋼繊維補強コンクリートの曲げ引張強度を図-3、図-4に示す。図中には、別途実施した室内実験データも併せて示す。図-3より鋼繊維では、繊維混入率0.75vol%程度までは混入率の増加に伴い、曲げ引張強度が増加することがわかる。しかしながら、0.75vol%付近を境にそれ以上の混入率では、1.0vol%のデータが極端に少ないため明確な傾向が確認できず、1.0vol%の曲げ引張強度を推定することは困難である。そのため、本検討においては、鋼繊維の混入率の適用範囲を0.5～0.75vol%とする。また、適用範囲内における曲げ引張強度の特性値 (f_{ft}) は、混入率1.0vol%以外のデータを用いて、原点を通る近似直線により求まる値に対し、試験データのばらつきを考慮するため、変動係数より算出される割増し係数 α で除することにより求めた。

一方、図-4に示す非鋼繊維では、鋼繊維に比べデータ数が少なく、0.5vol%を越える混入率の現場試験データがないが、繊維混入率の増加に伴う曲げ引張強度の増加傾向が確認できる。そのため、本検討においては、非鋼繊維の混入率の適用範囲を0.5～1.0vol%とする。また、曲げ引張強度の特性値 (f_{ft}) は、鋼繊維と同様に原点を通る近似直線により求まる値を割増し係数 α で除すこ

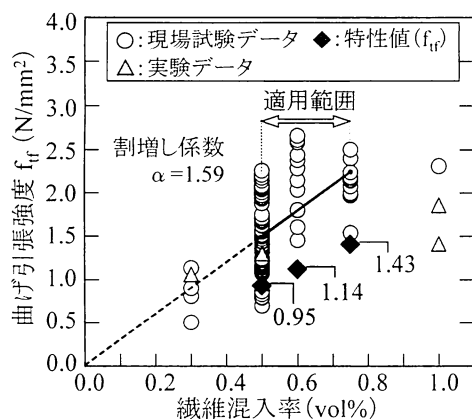


図3 繊維混入率と曲げ引張強度の関係（鋼繊維）

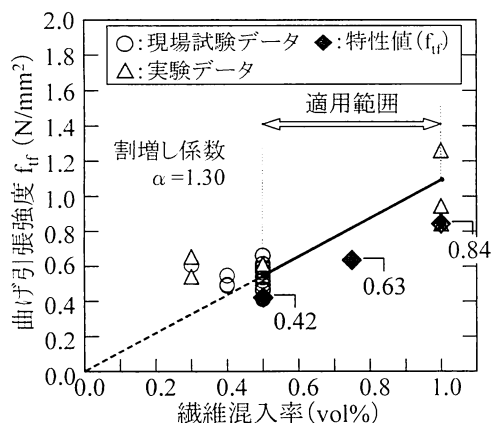


図4 繊維混入率と曲げ引張強度の関係（非鋼繊維）

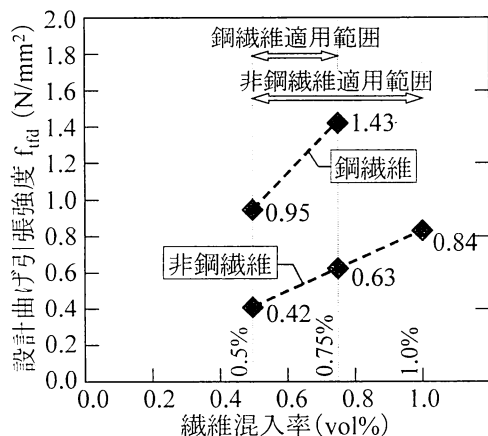


図5 繊維混入率と設計曲げ引張強度の関係

とにより求めた。

図-3、図-4に、最終的に算出された曲げ引張強度の特性値をそれぞれ示す。鋼繊維および非鋼繊維の曲げ引張強度の特性値（ f_{fr} ）は、概ね現場試験データの下限付近の値を示している。

(3) 設計曲げ引張強度（ f_{td} ）の設定

覆工にFRCを適用する場合、標準的な設計曲げ引張強度（ f_{td} ）の提案を行う。ここで、設計曲げ引張強度は、前述の曲げ引張強度の特性値（ f_{fr} ）を材料係数 γ_m で除

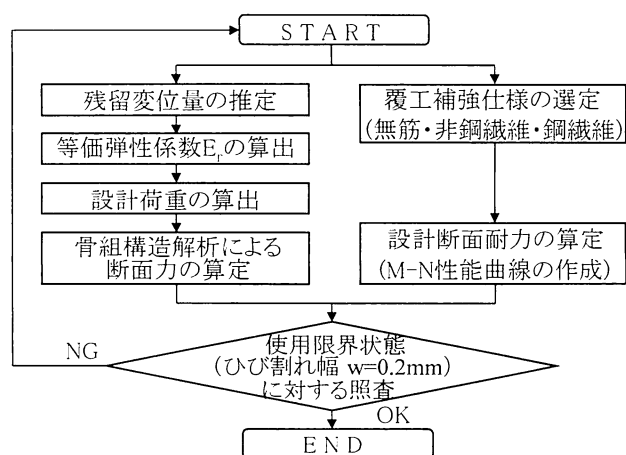


図-6 変位未収束対策における覆工設計のフロー

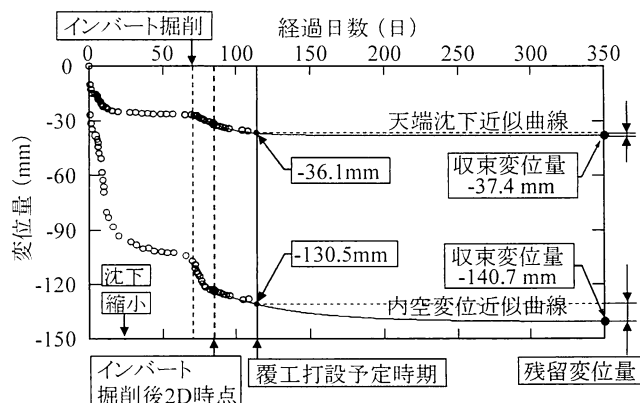


図-7 坑内A計測結果の事例と残留変位量の概念

した値とした。なお、本検討においては、FRC覆工の設計を限界状態設計法の概念によることとし、照査すべき限界状態を使用限界状態¹¹⁾と考えることから、材料係数を $\gamma_m=1.0$ としている。算出した設計曲げ引張強度の提案値を図-5に示す。

3. 変位未収束対策におけるFRC覆工の設計手法の検討

次に、前述の設計曲げ引張強度の提案値にもとづき、非鋼繊維と鋼繊維それぞれの対荷特性を考慮した覆工設計手法について検討を行う。

(1) 設計フローの概要

筆者らが考える変位未収束対策における覆工設計のフローを図-6に示す。また、残留変位量の概念図を図-7に示す。

まず、坑内A計測結果から、インバート掘削後から2D（D：トンネル掘削幅）離れ時点の変位量を基準に、クリープ関数や双曲線等の近似式を用いた変位量のフィッティング¹²⁾を行い、最適な近似曲線により変位収束の判

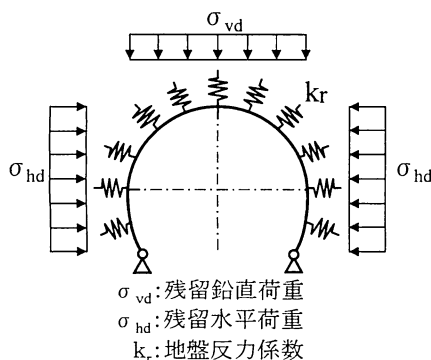


図-8 骨組構造解析のモデル

定と収束変位量の予測を行う。予測された収束変位量と覆工打設予定時期における変位量の差が、いわゆる残留変位量と位置付けられる。ここで、インバート掘削後から2D時点をフィッティングの基準と考えるのは、一般にはインバート掘削後、最低でも2D程度の掘削が進行すれば、掘削の影響に伴う地山の弾性変形は終了すると考えられるためである。しかしながら、インバート掘削後2D時点を基準とできない場合は、各トンネルの状況を勘案してフィッティングの基準点について検討を行う必要がある。また、フィッティングの結果、直線近似に最も相関が高いと認められる場合等、変位が収束傾向にないと判断される場合には、さらに経過を観察するか、増し支保等の実施による対策が必要となる。

トンネルの支保工の効果を含む地山の等価弾性係数 E_t は坑内A計測結果ならびに残留変位量から算出する。その際、一般的には有限要素法による順解析あるいは逆解析が適用されることとなるが、坑内A計測の結果によっては、現実と乖離した地山の等価弾性係数が得られる場合もあるため、既往のデータ等を参考にその妥当性について判断を行う必要がある。

設計荷重は、残留鉛直荷重 (σ_{vd}) と残留水平荷重 (σ_{hd}) によって与えられるものであり、地山の等価弾性係数と残留変位量から決定する。決定した設計荷重をもとに、骨組構造解析によって覆工の設計断面力を算定する。骨組構造解析のモデルを図-8に示す。骨組構造解析においては、インバートをモデル化せず、その効果を覆工脚部のヒンジとして考慮すれば良い。また、地盤反力係数 K_r は、地山の等価弾性係数をもとに算定する。

(2) 照査の考え方

照査については、覆工コンクリートの限界ひび割れ幅を考慮した設計断面耐力による使用限界状態に対して行う。たとえば、整備新幹線においては、水密性が損なわれ長期耐久性が失われる状態のひび割れ幅の目安として0.2mmという値が示されており、補修等を行う場合の基準となっている。そこで、本検討においても、限界ひび割れ幅0.2mmを使用限界状態における照査基準値として

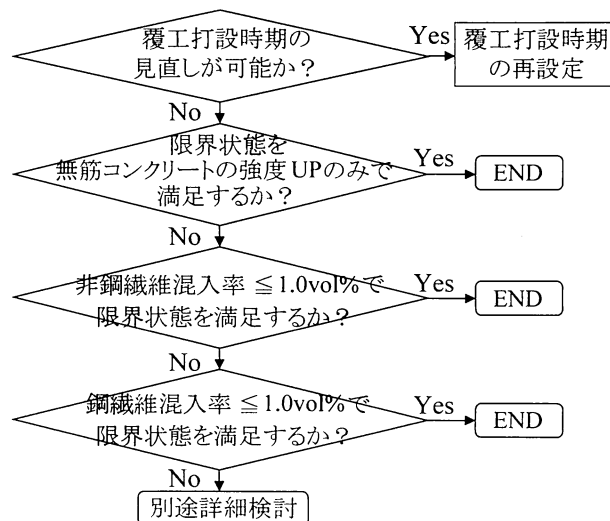


図-9 段階的な照査の考え方

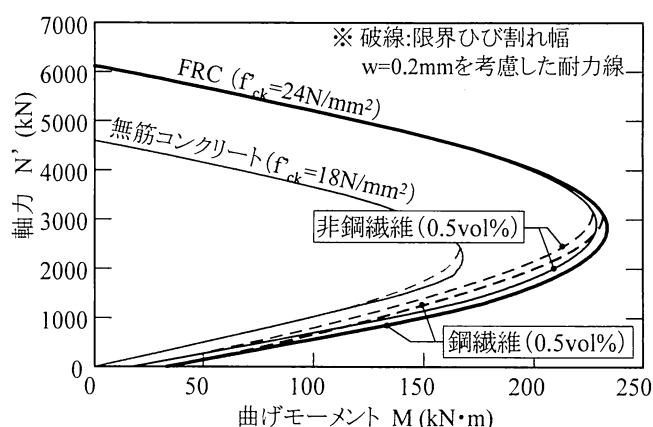


図-10 限界ひび割れ幅を考慮した M_u-N_u 曲線の例

設定することとする。

段階的な照査のフローを図-9に示す。照査は、まず無筋コンクリートを覆工に用いた場合に対して行うものとする。無筋で限界状態を満足しない場合は、FRCでの照査へと段階的に進むこととなる。ただし、フローでは、覆工打設時期の見直しについて一義的に示しているが、覆工に作用する残留荷重の影響をできるだけ低減させるという考え方は、一連の照査における各段階において有効な方策であることに留意が必要である。最終的にFRCでの対応が困難な場合は、RC構造の採用等について別途検討を行う必要性がある。

限界ひび割れ幅を考慮した具体的な照査は、 M_u-N_u 曲線¹⁾を用いて行う。 M_u-N_u 曲線を作成するにあたり、非鋼繊維と鋼繊維それぞれの耐荷特性を考慮するため、整備新幹線トンネルで実施された曲げタフネス試験結果をもとに提案した図-5に示す設計曲げ引張強度を用いる。設計曲げ引張強度を考慮した場合の M_u-N_u 曲線の例を図-10に示す。図中には、限界ひび割れ幅として0.2mmを考慮した場合の耐力線を破線で示している。このように、設計曲げ引張強度の差を定量的に考慮することで、変位

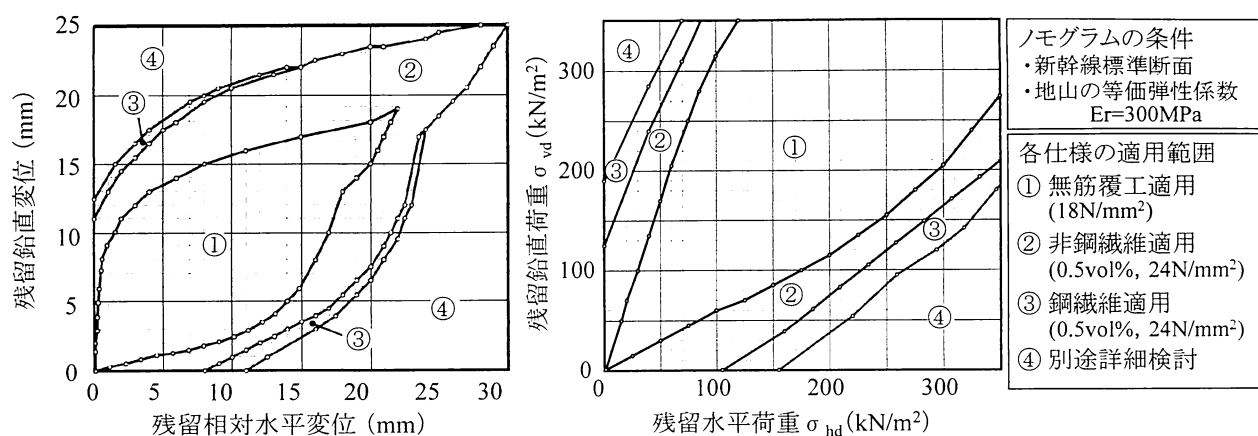


図-11 ノモグラムの例 ($E_r=300\text{MPa}$) (左：残留変位, 右：残留荷重)

未収束対策のように、とくに曲げモーメントの影響が卓越する低軸力状態において、無筋、非鋼繊維、鋼繊維の耐荷特性の差別化を図ることでき、覆工設計の合理化を図ることが可能となる。

(3) ノモグラムを活用した簡易設計の検討

整備新幹線のように、トンネル断面形状が標準的に設定されるようなケースでは、覆工仕様の選定を行う際に、逐一骨構造解析によって断面力を算定したうえで設計照査を実施しなくとも、より簡便な方法を適用できる可能性がある。たとえば、既往の研究¹³⁾では、ノモグラムを適用することで、膨張性地山における覆工の簡易設計を試みた事例が報告されている。そこで、本検討においても、覆工補強の仕様毎の適用可能範囲を明確にすることで、簡易な覆工設計が可能となるノモグラムの作成を実施した。

地山の等価弾性係数、覆工に作用する残留荷重および残留変位量をパラメータとして、に示すようなノモグラムを作成することができる。このノモグラムの使用方法是、ある地山の等価弾性係数（図-11は $E_r=300\text{MPa}$ の例）の適用条件下において、想定する覆工打設予定時期における残留変位量あるいは残留荷重から、覆工仕様の適用可能範囲を選定するというものである。さらに、覆工打設時期の見直しによって対応を図る場合においても、想定する覆工仕様の適用可能範囲から、目安となる残留変位量を簡易に求めることができるため、現場における施工管理に活用することが可能である。なお、ノモグラムの境界線は、図に示した範囲内で安全側となるように設定している。

ここで示したノモグラムは、地山の等価弾性係数 $E_r=300\text{MPa}$ における一例であるが、このようなノモグラムを、実際に地山の変位未収束対策が問題となる特殊地山条件の範囲（地山の等価弾性係数 $E_r=50\sim300\text{MPa}$ 程度）で数パターン作成しておけば、現場から直接得られる情報をもとに、簡易かつ迅速に覆工仕様を選定するこ

とが可能となる。ただし、ノモグラムは限られた前提条件にもとづき作成されたものであるため、その適用範囲に十分留意したうえで運用することが不可欠である。

4. まとめ

本稿では、変位未収束区間の覆工補強にFRCを採用する場合を対象とし、整備新幹線トンネルの現場試験データをもとに、非鋼繊維、鋼繊維それぞれの耐荷特性を設計曲げ引張強度の差として評価した。また、無筋、非鋼繊維、鋼繊維の耐荷特性を考慮した段階的な覆工の設計手法について検討を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

- ・整備新幹線トンネルの建設現場において実施された曲げタフネス試験結果を用いて、工学的な判断にもとづき鋼繊維および非鋼繊維の各繊維混入率に対応する標準的な設計曲げ引張強度を提案した。
- ・覆工コンクリートの限界ひび割れ幅による使用限界状態を満足すべき覆工の要求性能と位置付け、無筋、非鋼繊維、鋼繊維の各々の耐荷特性を反映させた段階的な設計照査の考え方を示した。
- ・予測される残留荷重あるいは残留変位量から、簡易に覆工仕様を選定可能なノモグラムの適用可能性について示した。

今後、これらの基準化を進め、整備新幹線トンネルの新設工事への展開を図るとともに、FRC覆工の合理的な設計を実現していきたいと考える。なお、FRCの現場試験データのさらなる蓄積と設計曲げ引張強度の評価の深度化、ノモグラムの整備および実用化に向けた精度の検証等が今後の課題である。

謝辞：本検討を実施するにあたり、貴重な御助言を頂いた山口大学 吉武勇准教授に深甚なる謝意を示すものである。

参考文献

- 1) 末永充弘, 佐藤愛光, 近久博志, 筒井雅行: SFRC 覆工で蛇紋岩膨張区間を克服 九州新幹線 第二今泉トンネル, トンネルと地下, Vol.27, No.3, pp.7-14, 1996.
- 2) 末永充弘, 佐藤愛光, 近久博志, 筒井雅行: SFRC 覆工で収束しない変位に対抗 東北新幹線 岩手トンネル女鹿工区, トンネルと地下, Vol.29, No.5, pp.7-18, 1998.
- 3) 北川修三, 登坂敏雄, 長谷川達也, 中川信男, 鈴木一成: 膨張性地山における二次覆工の設計, トンネル工学研究報告集, Vol.7, pp.153-158, 1997.
- 4) 登坂敏雄, 前田昌康, 福田勝美, 西村元男: 膨張性軟岩における二次覆工の設計に関する考察, 土木学会論文集, No.623/IV-43, pp.109-118, 1999.
- 5) 岡崎準, 小川淳, 田村武: 膨張性地山におけるトンネル覆工の設計法, トンネルと地下, Vol.35, No.10, pp.47-56, 2004.
- 6) 中村敦, 小野利昭, 亀谷英樹, 呉旭: 膨張性地山での二次覆工の現状評価と設計手法の提案ー北陸新幹線 飯山トンネル東菅沼工区ー, トンネルと地下, Vol.38, No.4, pp.39-47, 2007.
- 7) 高橋幹夫, 津野究, 小島芳之: 大型トンネル覆工模型実験装置の開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, III-70, pp.139-140, 2006.
- 8) 岡野法之, 植村義幸, 小島芳之, 生駒末年馬, 磯谷篤実: 大型覆工模型実験による繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握, トンネル工学研究報告集, Vol.18, pp.143-148, 2008.
- 9) 岡野法之, 植村義幸, 小島芳之, 生駒末年馬, 井浦智実: 大型覆工模型実験による繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-393, pp.785-786, 2009.
- 10) 岡野法之, 嶋本敬介, 小島芳之, 生駒末年馬, 高橋源太郎: 地盤反力の有無に着目した繊維補強覆工コンクリートの耐荷特性の把握, トンネル工学研究報告集, Vol.19, pp.193-198, 2009.
- 11) 日本鉄鋼連盟: 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, 2002.
- 12) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, pp.388-392, 2008.
- 13) 伊藤隆, 越智修, 小山昭, 長谷川達也, 永田章: 膨張性地山における二次覆工簡易設計のためのノモグラム作成, トンネル工学研究報告集, Vol.9, pp.155-160, 1999.

STUDY OF DESIGN METHOD FOR FIBER REINFORCED CONCRETE TUNNEL LININGS IN SQUEEZING GROUND

Tomomi IURA, Osamu MARUYAMA, Yoshiyuki KOJIMA, Noriyuki OKANO and Takahito FUNAHASHI

In the tunnel located in squeezing ground, convergence of displacement may not be completed, before construct-ing tunnel lining. For this reason, load may act on tunnel lining. In such a case, the design method which does not exceed the proof stress of tunnel lining is required.

Recently, the examples that fiber reinforced concrete lining is adopted increase in tunnel construction of Shinkansen. In addition to conventional steel fiber, non steel fiber materials represented by polypropylene begin to be used. Therefore, We examined a new design method of tunnel lining in consideration of withstand load characteristic of fiber reinforced concrete with steel fiber and non steel fiber.