

トンネル覆工コンクリートの単鉄筋補強から 非鋼繊維補強への変更

溝端 拓哉¹・海瀬 忍²・赤松 博巳³

¹正会員 株式会社竹中土木 名古屋支店 (〒460-0003愛知県名古屋市中区錦一丁目18-22)

E-mail:mizobata-t@takenaka-doboku.co.jp

²中日本高速道路東京支社 清水工事事務所 (〒424-0114静岡県静岡市清水区庵原町219-11)

³株式会社竹中土木 名古屋支店 (〒460-0003愛知県名古屋市中区錦一丁目18-22)

新東名高速道路清水第二トンネルは、静岡県静岡市清水区に位置する掘削断面積190㎡に達する大断面トンネルである。新たな取り組みとして覆工コンクリートに混入している非鋼繊維の量を変更することにより標準的に覆工コンクリートに設計されている補強単鉄筋の代替として適用できるか検討を行った。単鉄筋コンクリートと繊維補強コンクリートについて耐荷力を比較した結果、トンネルアーチ部においては繊維補強コンクリートの方が有効であることが分かった。繊維混入率を変更したコンクリートをもって試験施工を行った結果、作業の効率化がはかれ、かつ十分な品質を確保することができた。

Key Words : Tunnel lining concrete , Fiber reinforced concrete , Reinforced concrete,

1. はじめに

新東名高速道路本線において施工されるトンネルは、3車線を想定して断面を設定していることから掘削断面積が190㎡に達する大断面トンネルであり、扁平率0.65の扁平トンネルでもある。

新東名高速道路の扁平大断面トンネルでは、全線において地山等級に係らず、覆工コンクリートの剥離、剥落防止を目的として、非鋼繊維補強材料(0.3 vol%)の混入が計画されている。また、地山等級DのうちDⅠ区間及びDⅢ区間においては、覆工コンクリートは鉄筋による補強がなされている。DⅠ区間では、内空側に単鉄筋、DⅢ区間では、複鉄筋によるものである。

当トンネルでは、全線に渡って内空変位の収束を確認した後に覆工コンクリートを打設しているため、トンネルの安定に関して力学的には不要であるが、長期にわたる安全を確保するために覆工を設けている。一般的には、坑口付近や土かぶりが薄い区間、他の構造物と近接している場合等、覆工に偏土圧が作用し曲げモーメントが生じる恐れがある場合に、覆工を鉄筋で補強した構造にしている例が多いが、新東名トンネルでは、扁平大断面であるところを考慮しDⅠ区間の覆工において単鉄筋(2車線の坑口部などと同様)で補強した構造¹⁾としている。

補強鉄筋の具体的な設計に関する規定がないため、単鉄筋コンクリート及び繊維補強コンクリートについてその耐荷力を検証することにより、単鉄筋で補強されたDⅠ区間における覆工コンクリートの無筋化について検討を行った。覆工コンクリートの無筋化を行うことにより、以下の利点があげられる。

- ①鉄筋の組立て手間の省略による工程短縮ができ、鉄筋の組み手間のコストが削減できる。
- ②コンクリート打設時の締固め施工性向上によるコンクリート品質の向上、コンクリートの確実な充填ができる。
- ③鉄筋の段取り筋等の省略から防水シートを完全非貫通とし、防水性の向上。また、鉄筋施工時の防水シートの損傷防止ができる。
- ④かぶり管理や鉄筋の位置出し測量等の手間が省略できる。

2. 検討方法

(1) 検討内容

今回の検討では、単鉄筋コンクリートのDⅠ区間において、単鉄筋コンクリートの代替として非鋼繊維補強材

(0.2 vol%) を増加した補強コンクリートについて単鉄筋コンクリートの耐力と同等以上となるか、耐荷力を比較し検討を行った。非鋼繊維補強材混入率0.5 vol%のコンクリートは鋼繊維において実績があり、検討の出発点として設定した。繊維補強コンクリートに着目した理由としては、内空側も地山側も同等な曲げ抵抗力を有するため、内空側のみに施す単鉄筋コンクリートの地山側が引張となる曲げに対する効果よりも有効に働くと考えられる。

(2) 検討方法

補強の主目的であるトンネルに対する予期できない荷重に対する要求性能は、地山条件、土かぶり条件等により影響を受けるため、現状では不明確である。そこで、標準的なDⅠ地質であることを前提に代表的な荷重状態として、鉛直荷重および側方荷重を等分とし、側圧比を1.0と0.5とした2種類のパターン「鉛直荷重1対水平荷重1」と「鉛直荷重1対水平荷重0.5」の荷重による設計断面力を算定し、鉄筋コンクリート（以下 RC とする）の耐荷性能を推定する。

RCの耐力は「コンクリート標準示方書[設計編]」に基づき表-1のように計算条件を設定した。

鉛直荷重および側方荷重を徐々に大きくし、部材に生じる断面力が断面耐力線に接した時点を覆工の耐荷力と定めた。そして、同様に算定した設計断面力から繊維補強コンクリートによる耐荷性能を推定し比較した。繊維補強コンクリートの耐力算定は「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】」²⁾を参考に行った。

参考文献3で定められている限界状態Ⅰとは、覆工体の耐久性を確保する観点から定めた限界状態であり、限界ひびわれ開口幅0.25mmで照査をするものである。限界ひびわれ幅は覆工厚によらず一定とする。限界ひびわれ幅を0.25mmとしている根拠としては、鉄筋コンクリートに比べ繊維補強材が分散されて配置されているため、ひびわれそのものを拘束する機能を持っていることから耐久性についても有利であること、また、「コンクリート標準示方書（構造性能照査編）」では水密性に対す

表-1 鉄筋コンクリート計算条件

項目	アーチ部	インバート部
部材高さ	500mm	700mm
部材幅	1000mm	
有効高さ	394mm	594mm
コンクリートの設計基準強度	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$	
鉄筋	SD345	
	D19@200	
コンクリートの引張強度	$f_t = 2.22 \text{ N/mm}^2$	
	$(0.23 \times f_{ck}^{2/3})$	

表-2 繊維補強コンクリート計算条件

項目	アーチ部	インバート部
部材高さ	500mm	700mm
部材幅	1000mm	
コンクリートの設計基準強度	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$	
補強繊維材	バルチップJK	
繊維部材の引張強度	$f_{tf} = 0.777 \text{ N/mm}^2$	

表-3 限界状態Ⅰ詳細

限界ひびわれ幅	0.25mm	
材料係数	コンクリート	1.3
部材係数	圧縮	1.3
	曲げ	1.15
	構造物係数	1.1

るひびわれ発生制御および許容ひびわれ幅の目安として0.2mmが与えられているが、トンネル覆工体では繊維の効果により、貫通ひびわれが起これにくいことである。

NEXCO「施工管理要領（トンネル覆工繊維補強コンクリート編）」³⁾では短繊維補強コンクリートの強度管理として曲げ試験によるものとし、コンクリートに要求する性能として曲げ靱性曲線が設計基準線4.1kNを下回らず、品質管理曲げ靱性係数1.4 N/mm²を満たすことを規定しており、この基準を満たす引張軟化曲線から繊維補強コンクリートの引張強度を設定した。繊維補強コンクリートの計算条件は表-2のように設定した。

応力算定解析のモデル化はRCと繊維補強コンクリートの耐荷力の比較であるため、応力算定モデルは、図-7とした。骨組みは500mm程度の直線部材とし、節点は覆工コンクリート設計断面の中央とする。

・アーチとインバートはピン接続とする。

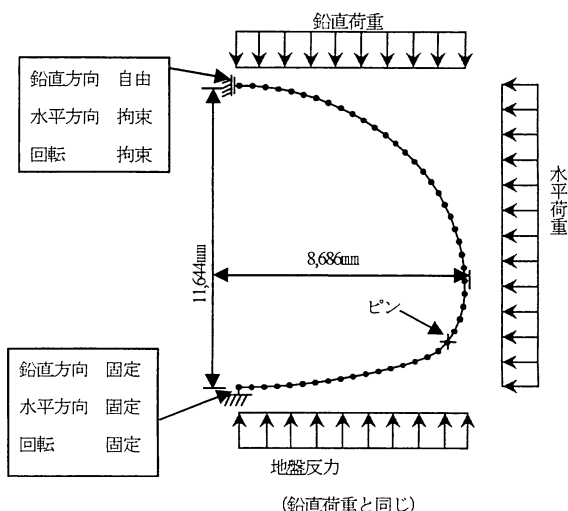


図-1 応力算定モデル

- ・支点はアーチとインバートの中央2点とし、水平方向・回転を拘束とするが、インバート中央はモデルの不動点として鉛直方向も拘束とする。

(3) 検討結果

図-2 に応力算定解析時の曲げモーメント図を示す。アーチ部においては、天端付近において内空側に引張となり、SL ライン付近において地山側に引張が最大となる。インバート部においては、断面力のすべてが内空側の引張となることから分かる。

RC と繊維補強コンクリートについて断面耐力線を描く。断面耐力線比較図に側圧比を 1.0 と 0.5 とした2種類のパターン「鉛直荷重 1 対水平荷重 1」「鉛直荷重 1 対水平荷重 0.5」の荷重から算出した各部材の断面力をプロットしていき、断面耐力線と断面力が交わった点が覆工の耐力力となり、その耐力力をそれぞれ比較する。

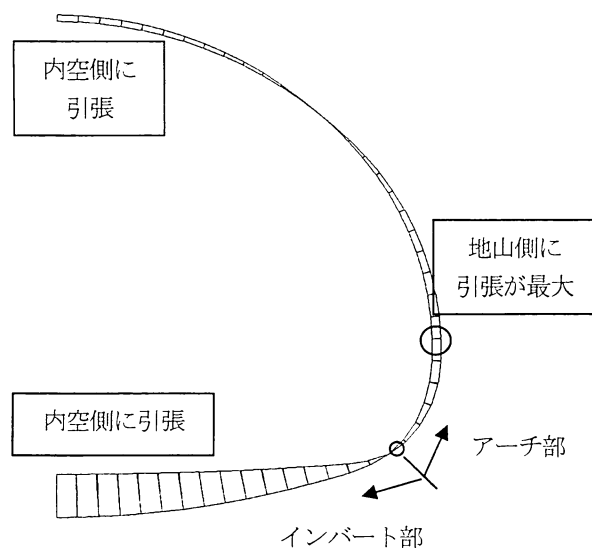


図-2 検討時の曲げモーメント図

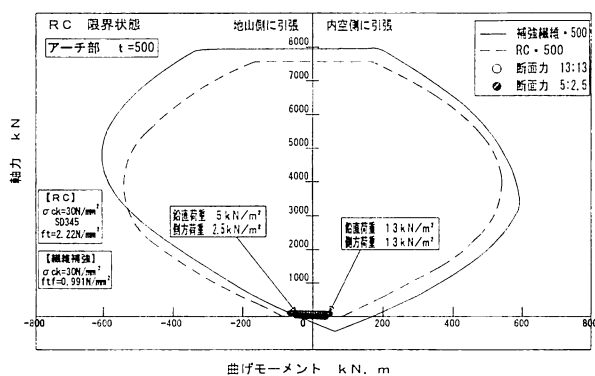


図-3 アーチ部の断面耐力線比較とRC限界状態

図-3 にはアーチ部の断面耐力線比較と耐力力となった際の RC の断面力を示す。耐力力は地山側が引張となる曲げで決定され、その際の荷重は側圧比 1:1 で 13 kN/mm^2 、側圧比 1:0.5 で 5 kN/mm^2 である。図-4 にはインバート部の断面耐力線比較と耐力力となった際の RC の断面力を示す。耐力力は内空側が引張となる曲げで決定され、その際の荷重は側圧比 1:1 で 11 kN/mm^2 、側圧比 1:0.5 で 9 kN/mm^2 である。

次に同様に図-5、図-6 にアーチ部、インバート部の繊維補強コンクリートの断面力詳細図を示す。断面耐力線の比較から内空側が引張となる曲げに対しては RC の耐力が大きく、地山側に引張となる曲げに対しては繊維補強コンクリートの耐力の方が大きいこと分かる。アーチ部では繊維補強でも RC と同様に地山側が引張となる曲げで耐力力が決定され、その際の荷重は 20 kN/mm^2 であり、RC よりも大きな耐力力を有している。側圧比 0.5 の場合でも同様の傾向がみられる。表-4 に耐力力一覧表を示す。

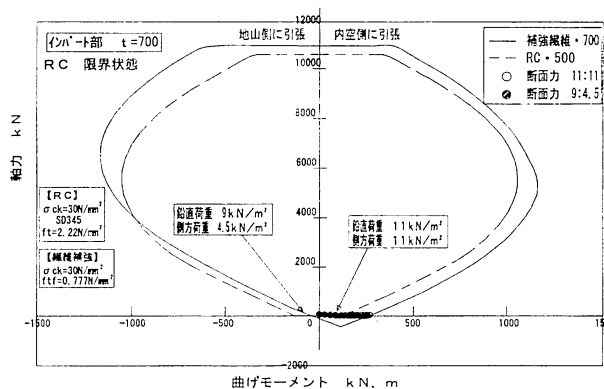


図-4 インバート部の断面耐力線比較とRC限界状態

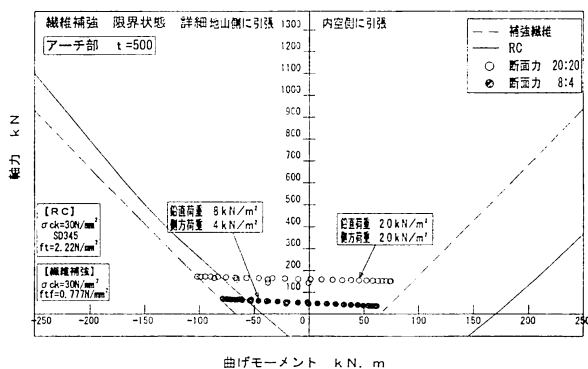


図-5 アーチ部の繊維補強限界状態

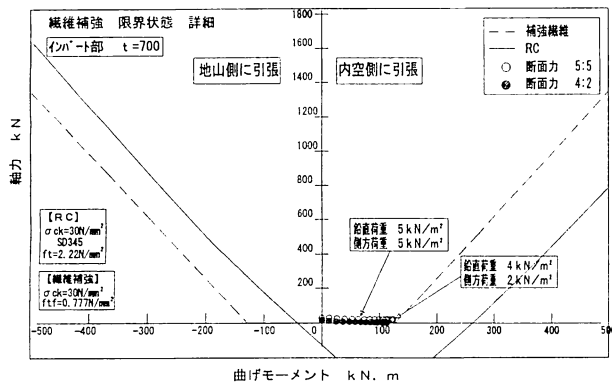


図-6 インバート部の繊維補強限界状態

表-7 耐荷力一覧表

覆工の耐荷力一覧(アーチ部 t = 500mm)

単位 (kN/m²)

鉛直:側方	鉄筋コンクリート(RC)		補強繊維コンクリート	
	鉛直	側方	鉛直	側方
1:1.0	13	13	20	20
1:0.5	5	2.5	8	4

覆工の耐荷力一覧(インバート部 t = 700mm)

単位 (kN/m²)

鉛直:側方	鉄筋コンクリート(RC)		補強繊維コンクリート	
	鉛直	側方	鉛直	側方
1:1.0	11	11	7	7
1:0.5	9	4.5	6	3

アーチ部においては覆工全体の耐荷力が増加することから繊維混入量を増加した補強繊維コンクリートによる覆工コンクリート無筋化が有効であるといえる。インバート部においては、断面力のすべてが内空側に引張となっているため、現行仕様の単鉄筋補強によるコンクリートが有効であるといえる。

3. 曲げ靱性試験について

繊維補強コンクリートの曲げ靱性試験の代表的な荷重-たわみ曲線は、ピークから大きく荷重が降下し、その後靱性を保持する傾向にある。強度による耐力の算定は、限界ひびわれ幅 0.25 mm までの範囲であり、それ以上は曲げ靱性の確保である。曲げ靱性性能は限界ひびわれ幅から中央点たわみを求め、曲げ靱性係数を算出する。

限界ひびわれ幅 $bc=0.25\text{ mm}$ の中央点たわみ δc は、

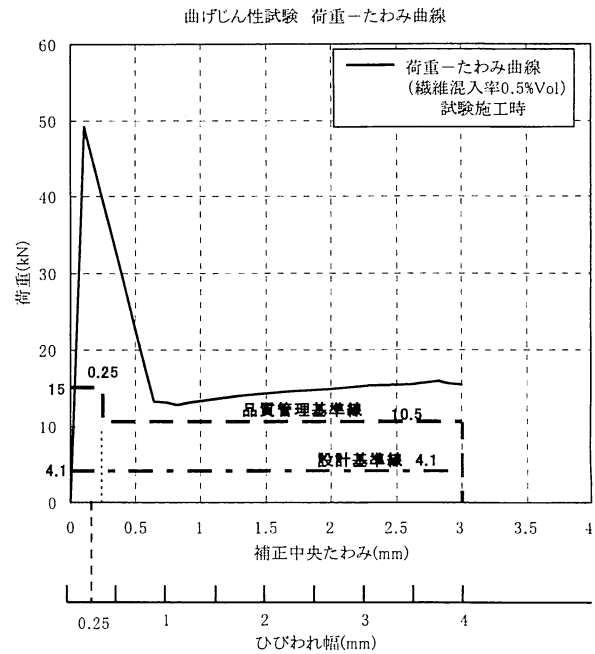


図-7 曲げ靱性試験の荷重-たわみ曲線

$$\delta c = \frac{3}{4} bc = \frac{3 \times 0.25}{4} = 0.19 \text{ mm}$$

→ 0.25 mm (安全率 $F=1.3$ とした場合)

また、繊維補強コンクリートのひびわれ強度 $f_{tf} = 0.777 \text{ N/mm}^2$ の曲げ荷重 P は、

$$f_{tf} = \frac{0.44 \cdot P \cdot L}{(b \cdot h^2)} \quad (1)$$

(曲げ試験供試体 $L=450\text{ mm}$ 、 $b=h=150\text{ mm}$)

(1)式より

$$P = \frac{0.777 \times (150 \times 150^2)}{(0.44 \times 450) \times 1000} = 13.2 \text{ kN}$$

→ 15 kN (安全率 $F=1.15$ とした場合)

したがって、曲げ耐力として必要とされる曲げ試験の荷重-たわみ曲線は図-7に示す品質管理基準線を上回り、曲げ靱性係数 1.45 N/mm^2 を確保することを前提とした。

耐力については、アーチ部は繊維補強コンクリートが優位であるが、インバート部は、想定されるような荷重状態においても内空側が引張となる曲げモーメントが発生するため単鉄筋コンクリートが優位となる。

したがって、アーチ部を繊維補強コンクリート、インバート部を鉄筋コンクリート(設計断面)とした。また、アーチ部とインバート部の接続部は、断面力算定のモデルではピン構造としているが、インバート部の鉄筋はアーチ部へ定着させるものとして、ずれ等を防止する。

4. コンクリート配合について

覆工無筋化で使用するコンクリートの配合は、非鋼繊維を従来の 0.3 vol%から 0.5 vol%に上げて混入することにより、繊維混入後のコンクリートの性状変化が大きく、流動性やワーカビリティを確保するのが困難であると考えられたため施工性の向上を目指して中流動コンクリート⁴⁾を参考にして、混和材に石灰石微粉末を使用する特殊な配合とした。

室内試験練りでは、ベーススランプフロー値 62.5 cm から非鋼繊維混入後のスランプフローロス平均は 6.7 cm であった。室内試験練では、工場出荷時から現場到着時までのスランプフローロスは見込んでいなかったが、現場実機試験の際に運搬時間 42 分でスランプフローロスが 5.5 cm あった。また、非鋼繊維混入後のフロー値は 41.0cm となり、現場到着時よりも 13.5 cm のロスとなった。これは室内試験時に確認した繊維混入ロスに経時によるロスが加わったためで、繊維投入 15 分後には、さらにフローロス量が 8 cm 増加し、打設可能なワーカビリティを確保することが難しい状況となった。そこで、高性能AE減水剤の使用量を 0.05 %増し、工場出荷時のスランプフロー目標値を 60 cm から 65 cmに変更し、再度実機試験を行った。繊維混入後のスランプフローロスは減水剤増加前と同様に 13.0 cm であったが、繊維投入 15 分後のフローロス量は 3.0 cm であり、ロスを少なく抑えることができた。非鋼繊維混入 60 分後までのフローロス量は 8.0 cm となり、施工性の向上を期待できるワーカビリティおよび各種強度試験を満足する品質基準を確保することができた。

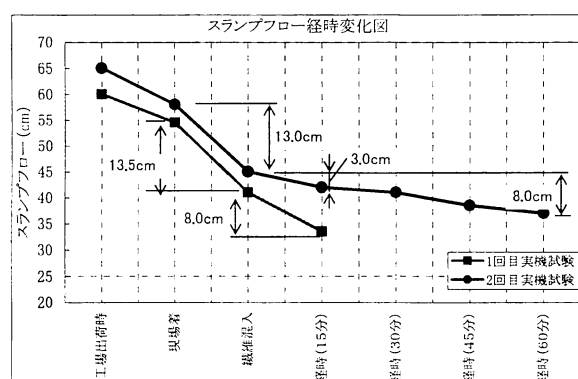


図-8 スランプ経時変化グラフ

5. 試験施工について

試験施工として、変位が 15 mm 程度で標準的なD I 区間2スパン (10.5 m×2スパン= 21.0 m) にて実施施工を行った。混入率 0.5 vol%の繊維補強コンクリートは、圧送時も材料分離を起こさずに良好な圧送を行うことができた。打設状況としては、通常時は有筋であるため、締固めが困難な状況も出てくるが、コンクリートの流動性が良好であり、また、無筋としたことによりコンクリート打設時の締固め施工性が向上した。通常時には棲枠に対策を講じる必要があるブリージング水が発生するが、今回はブリージング水の発生も極僅かであった。

コンクリート自体のワーカビリティの向上および施工性の向上により SL よりも下方に発生しやすい空気バタ等も非常に少なく密実なコンクリートとなった。覆工コンクリートの出来栄も向上することができた。

圧縮強度試験および曲げじん性試験等の品質試験については、品質規格を満足する結果が得られた。

6. おわりに

覆工コンクリートの補強鉄筋の代替として採用した非鋼繊維補強コンクリートについては、無筋化への取り組みの第一歩であるため、今回の解析では安全側と考えられる状況である。混入量を減らして同等の耐力を得ることができないか、繊維補強の評価手法、解析方法、繊維の形状についてもさらなる検討を行っていきたい。

謝辞：覆工無筋化の検討・施工について首都大学東京の西村教授には、評価方法に関して多くのご指導、ご協力をいただいた。紙面を拝借して改めて御礼申し上げる次第です。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路(株)：設計要領第三集トンネル編，2009.7
- 2) 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]，2002
- 3) 東・中・西日本高速道路(株)：トンネル施工管理要領 [繊維補強覆工コンクリート編]，2009.7
- 4) 東・中・西日本高速道路(株)：トンネル施工管理要領 [中流動覆工コンクリート編]，2009.7

CHANGE TO NON-STEEL-FIBER REINFORCEMENT FROM REINFORCED CONCRETE OF TUNNEL LINNING

Takuya MIZOBATA , Shinobu KAISE and Hiromi AKAMATSU

The Shimizu No.2 Tunnel Inbound Lane on New Tomei Expressway is in Shizuoka City, and a large cross-section tunnel that reached an excavation cross-section area of 190m². As a new effort, by changing the non-steel fiber volume mixed with lining concrete, we tried to apply this as a substitute for single rebar that is standard in lining concrete design. The load bearing abilities of reinforced concrete and the fiber reinforcement concrete were compared as a review method. As a result, it turned out that the fiber reinforcement concrete was effective in the tunnel arch part. The work efficiency went up as a result of doing the trial construction and an enough quality was able to be secured.