

# 膨張性地山のトンネル二次覆工の設計

## Design of Tunnel Lining in Squeezing Ground

坂口 秀一\*  
Shuichi Sakaguchi

北川 隆\*  
Takashi Kitagawa

### 要 約

鍋立山トンネル中工区の32km620m～32km760m付近の約140m区間は、掘削後の地山の押し出しにより一次支保が変形余裕量以上に変状を来し、対策工として施工した増吹・増枠によって必要二次覆工断面が侵された状況であった。このため、当該区間については縫い返しが計画されていた。

しかし、地山の押し出し性が強い為、縫い返し作業によって地山を乱すと再び大きな荷重を受けることが予想された。また、工程の制約から縫い返し区間を極力短くすることが要求された。そこで、二次覆工の最小巻厚を20cmとすることで、縫い返し延長を減少させることとした。これを受けて、巻厚20cmで標準二次覆工巻厚30cmと同等の耐力を有する構造検討を行った。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 検討条件
- § 3. 検討結果
- § 4. 実施工への反映
- § 5. おわりに

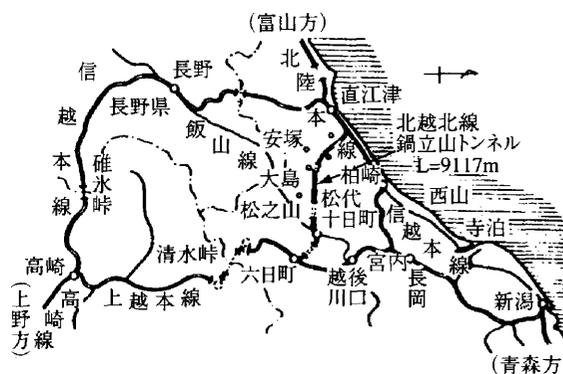


図-1 北陸北線概略図

## § 1. はじめに

北越北線は、図-1に示すとおり上越線の六日町より十日町市、松代町を経て、信越本線の犀潟に至る延長59.4kmの鉄道である。

鍋立山トンネルは、この路線のほぼ中央に位置し、松

代町～大島村を結ぶ全長9116.5mの単線トンネルである。

当社は中工区の延長3327mを施工したが、強大な膨張性地圧に悩まされ続け、特に中央部の645m区間は、掘削に10年の工期を要した(図-2参照)。このような状況下で、縫い返し部の二次覆工の形状について種々の検討がなされた結果、以下のように決定された。

- ① レールレベルを120mm下げる(図-3参照)。

\* 土木設計部設計課

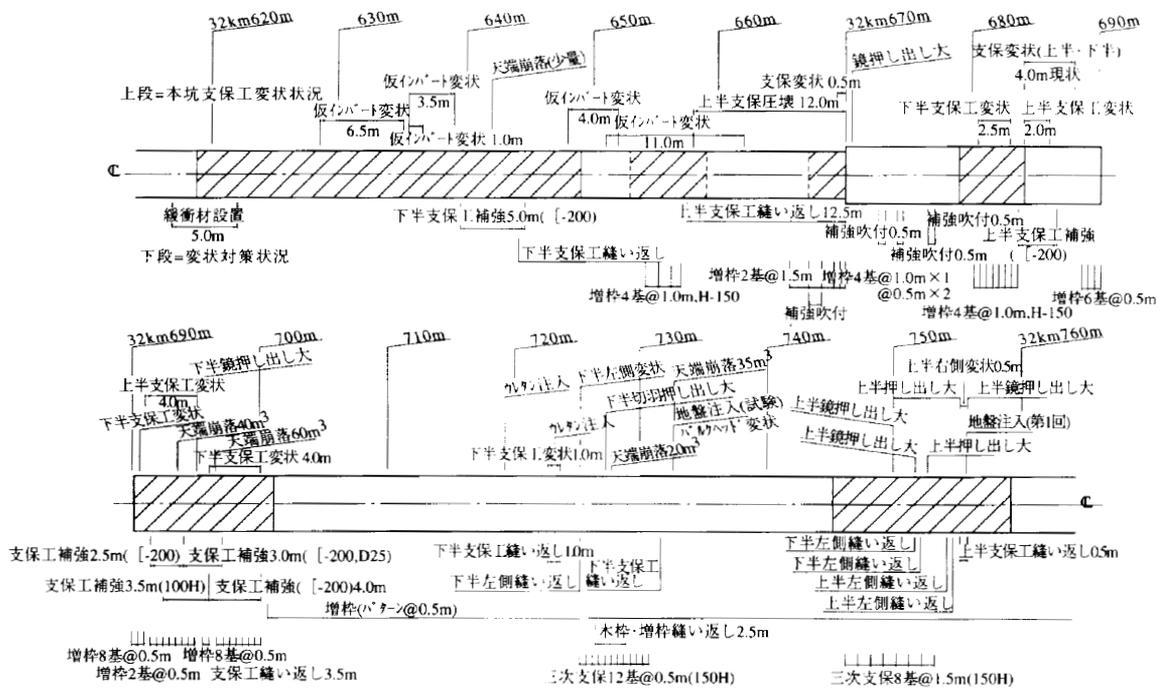


図-2 縫い返し区間の支保変状及び変状対策

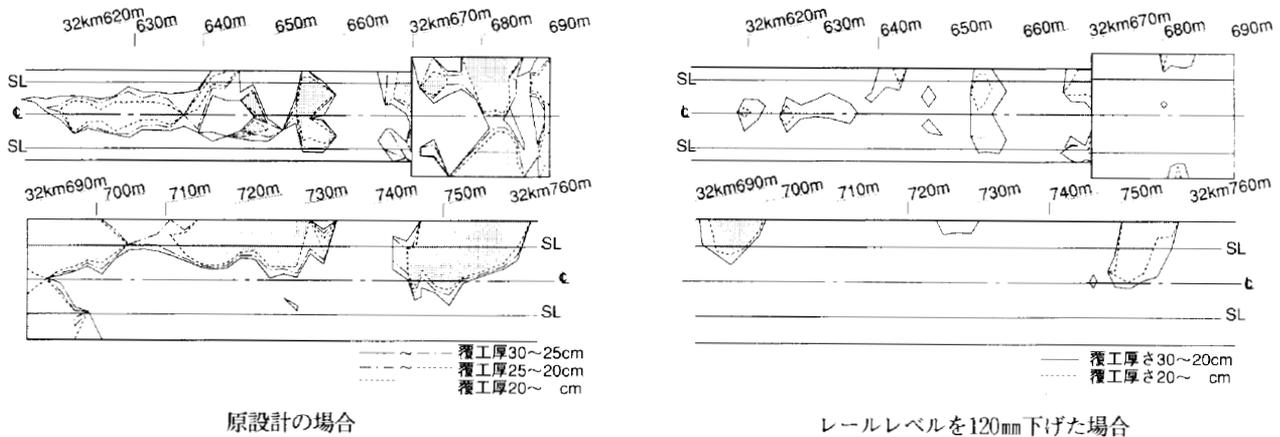


図-3 縫い返し範囲展開図

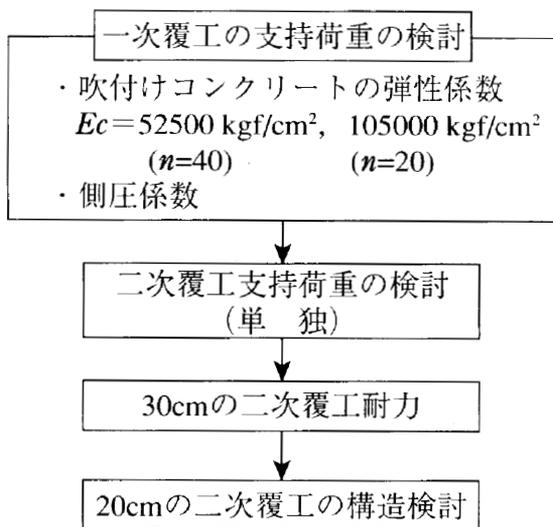


図-4 検討フロー図

- ②対象区間の二次覆工断面を卵形とする。
- ③二次覆工は最小巻厚20cmを確保する。

本報は、当工事の最終局面である二次覆工の構築に際し、縫い返し延長を大きく減少させることを目的として、最小巻厚20cmの二次覆工が巻厚30cmの二次覆工耐力と同等となるように、その構造を検討した結果を報告する。

## § 2. 検討条件

### 2-1 検討方針

検討は図-4に示すフローにしたがって行った。一次覆工・二次覆工部材を、それぞれ弾性骨組み構造物として取り扱い、折れ線近似モデルでモデル化した。図-5に検討断面図を示す。一次覆工、二次覆工ともに単独で

取り扱ったが、とくに二次覆工については、以下の理由により単独で取り扱うことが適切と判断した。

- ①対象区間の変位は収束しており、地山は安定状態にある。掘削時に発生した大きな変位は、上半掘削後～下半切羽到達までの間に大部分が発生している。
- ②一度応力解放が完了していること、縫い返し断面の切り抜け面積は内空断面積に比べて小さいこと等から、縫い返し後の変位は小さいと考えられる。
- ③縫い返しによる変位の収束後は、縫い返し前と同様に地山の状態が保持できるものと考えられる。
- ④一次覆工の変位が収束して地山が安定状態にある場合は、二次覆工に作用する荷重は少なく、二次覆工は化粧巻きとしての性格が強い。

2-2 一次覆工支持荷重の検討

対象区間の一次覆工は、増吹・増枠を施した箇所が大部分である。このような状況下の一次覆工は、大きなひずみが蓄積された状態にあるため、鋼製支保工・吹付けコンクリートの応力度が限界状態にあるものと考えた。

本検討では、以下の項目をパラメータとした。

- ①側圧係数  $K=0.4\sim 1.2$
- ②吹付けコンクリートと鋼材の弾性係数比  $n=10\sim 40$
- ③作用荷重  $p_v=50\sim 200\text{tf/m}^2$  ( $0.5\sim 1.96\text{MPa}$ )

荷重図を図-6に示す。

解析結果から、着目応力度に相当する作用荷重を求め、鋼製支保工と吹付けコンクリートが同時に限界状態となるとき側の係数及び弾性係数比を把握した。

2-3 二次覆工の検討

巻厚20cmの二次覆工の構造検討を行う際には、図-7に示すように、荷重の増加に伴う断面内の応力状態とし

て4段階を仮定した。

①状態 I

コンクリートの引張応力度が設計引張強度を超えない状態。この状態では断面内にクラックが発生しないため、全断面有効である。

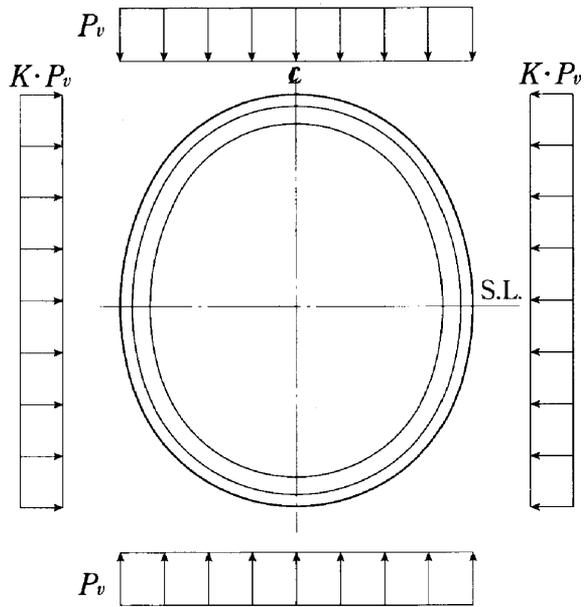


図-6 荷重図

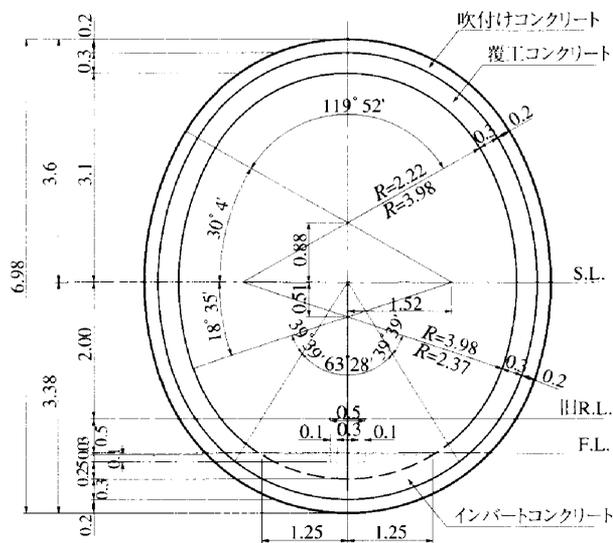


図-5 検討断面図

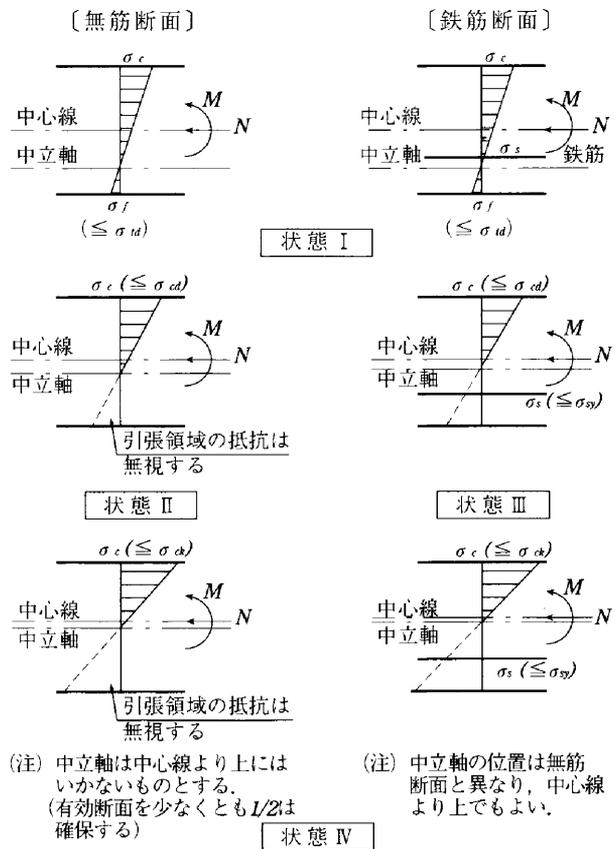


図-7 二次覆工断面内の応力状態

②状態Ⅱ

コンクリートの引張応力度が設計引張強度を超えた状態。この状態では、断面引張端部にクラックが発生し有効断面が減少する。この場合には、圧縮縁の応力度が設計圧縮強度を超えないことが条件である。

③状態Ⅲ

鉄筋補強断面で断面内に発生するコンクリートの引張応力度が設計引張強度を超え、引張側の鉄筋が降伏点に達した状態、または、状態Ⅱと同様に圧縮側のコンクリート応力度が設計圧縮強度を超えない状態。

④状態Ⅳ

圧縮側のコンクリート応力度が設計基準強度に達して破壊する状態。このときひずみの増加とともに応

力度が低下し、断面力の釣り合い状態が維持できなくなるため圧縮破壊する。

この仮定の下に、巻厚30cmの各段階における耐力を求め、同等の耐力となる巻厚20cmのコンクリート強度及び鉄筋補強等について検討を行った。この結果から、二次覆工に要求する状態を設定することによって、巻厚20cmの構造が決定できるものと考えた。

§ 3. 検討結果

3-1 一次覆工

(1) 弾性係数比 $n=20$ を一定とした場合

弾性係数比を $n=20$ としたときに、側圧係数を $K=0.4\sim$

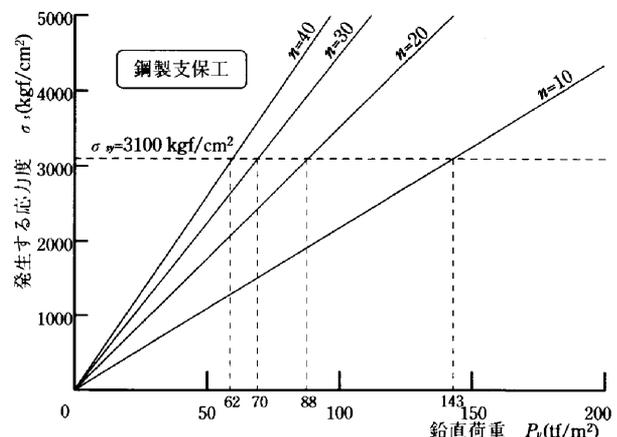
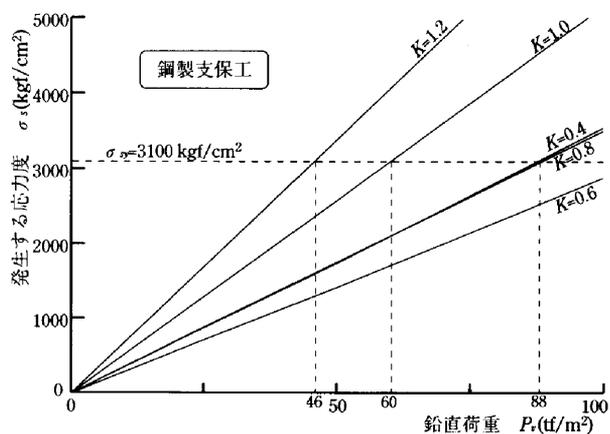
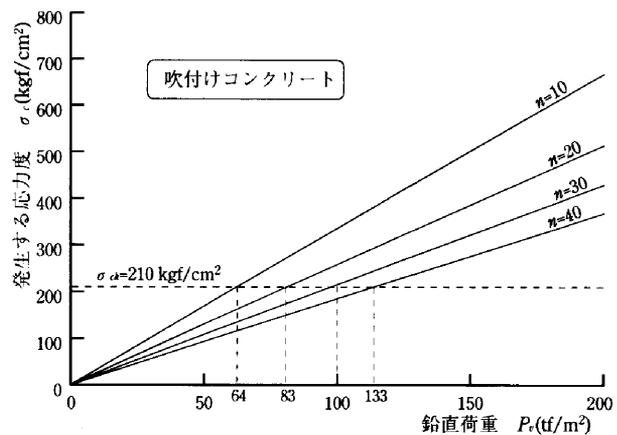
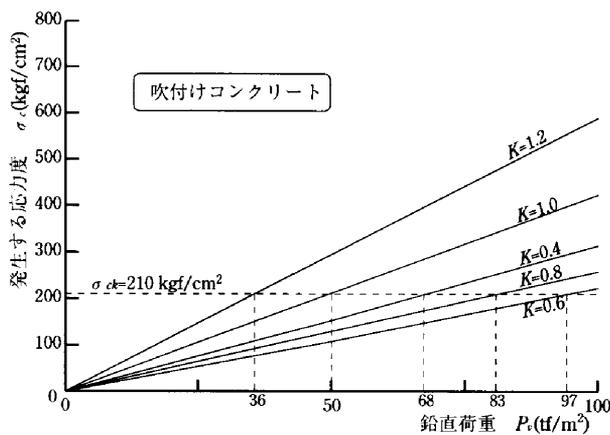


図-8 鉛直荷重と応力度の関係 ( $n=20$ の時)

図-9 鉛直荷重と応力度の関係 ( $K=0.8$ の時)

表-1 支持荷重 ( $n=20$ の時)

表-2 支持荷重 ( $K=0.8$ の時)

単位:  $\text{tf/m}^2(\text{MPa})$

	側圧係数	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
支持荷重	吹付けコンクリート	68 (0.67)	97 (0.95)	83 (0.81)	50 (0.49)	36 (0.35)
	鋼製支保工	88 (0.86)	108 (1.06)	88 (0.87)	60 (0.59)	46 (0.45)

単位:  $\text{tf/m}^2(\text{MPa})$

	弾性係数比	10	20	30	40
支持荷重	吹付けコンクリート	64 (0.63)	83 (0.81)	99 (0.97)	133 (1.30)
	鋼製支保工	143 (1.40)	88 (0.86)	70 (0.69)	62 (0.61)

1.2の範囲で変化させ、吹付けコンクリートおよび鋼製支保工に発生する応力度を求めた。鉛直荷重と応力度の関係を図-8に、これより得られた支持荷重を表-1に示す。

これより、 $K=0.6$ の時に支持荷重が最も大きく、これを境にして小さくなるのが分かった。また、 $K=0.8$ の時に吹付けコンクリートと鋼製支保工の支持荷重がほぼ等しくなるのが分かった。これより以下の検討では、鉛直荷重を有効に支持できる $K=0.8$ を用いることとした。

(2) 側圧係数 $K=0.8$ を一定とした場合

側圧係数を $K=0.8$ とした時に、弾性係数比を $n=10\sim40$ の範囲で変化させ、吹付けコンクリート及び鋼製支保工に発生する応力度を求めた。鉛直荷重と応力度の関係を図-9に、これより得られた支持荷重を表-2に示す。

これより、 $n=20$ とした時の支持荷重が最も大きくなるのが分かった。

(3) 一次覆工の支持荷重

これらの結果を総合すると、側圧係数が $K=0.8$ で、弾性係数比が $n=20$ の時に、一次覆工が支持可能である鉛直荷重は最大となり、その値は $83\text{tf/m}^2$  ( $8.14\text{MPa}$ )となった。したがって、二次覆工検討時の荷重条件として、側圧係数を $K=0.8$ に設定することとした。

3-2 二次覆工

二次覆工の検討は以下の手順で行った。

①二次覆工 ( $t=30\text{cm}$ ) の支持荷重を求める。

二次覆工の応力状態として以下の3とおりを考えた。

- a) 状態Ⅰ：二次覆工にひび割れを発生させない状態。
- b) 状態Ⅱ、Ⅲ：ひび割れは発生するが圧縮側のコンクリートは設計圧縮強度を超えない状態 (状態Ⅱ)。または引張側の鉄筋の応力度が降伏強度を超えない状態 (状態Ⅲ)。
- c) 状態Ⅳ：圧縮側のコンクリートが設計基準強度に達した状態

②二次覆工 ( $t=20\text{cm}$ , 無筋) の構造検討を行う。

コンクリートの強度を上げることによって、 $t=30\text{cm}$ の場合と同等の耐力を有する構造とする。

③二次覆工 ( $t=20\text{cm}$ , 鉄筋補強) の構造検討を行う。

コンクリートの引張領域に鉄筋を配筋して、 $t=30\text{cm}$ の場合と同等の耐力を有する構造とする。

(1) 二次覆工 ( $t=30\text{cm}$ ) の支持荷重

側圧係数を $K=0.8$ とした時の支持荷重を求めた。

検討は以下の手順で行った。

①断面に任意の鉛直荷重を作用させたときに、コンクリートに発生する応力度を求める。

②鉛直荷重とコンクリートの応力度の関係をグラフ化

する。このとき、圧縮応力度は状態Ⅱ、ⅢおよびⅣが対象となるため、引張側の抵抗を無視して求めた。

③各状態ごとに設定強度を超える時の鉛直荷重を導く。この荷重を二次覆工 ( $t=30\text{cm}$ ) の支持荷重とする。

なお、各状態ごとの設定強度は以下のとおりとした。

状態Ⅰ

設計引張強度<sup>3)</sup>  $\sigma_{td}=12\text{kgf/cm}^2$  ( $1.18\text{MPa}$ )

状態Ⅱ、Ⅲ

設計圧縮強度<sup>3)</sup>  $\sigma_{cd}=138\text{kgf/cm}^2$  ( $13.5\text{MPa}$ )

状態Ⅳ

設計基準強度  $\sigma_{ck}=180\text{kgf/cm}^2$  ( $17.7\text{MPa}$ )

検討より得られた鉛直荷重と応力度の関係を図-10に、各状態ごとの支持荷重を表-3に示す。

(2) 二次覆工 ( $t=20\text{cm}$ , 無筋) の構造検討

二次覆工 ( $t=20\text{cm}$ , 無筋) に (1) の検討結果から得られた支持荷重を作用させた時に発生する応力度を求めた。このとき、各状態ごとの支持荷重に対して、応力度が設定強度を満足することができるコンクリート強度 (設計基準強度) を導いた。

なお、応力度の算定時には、状態Ⅰは全断面有効とし、状態Ⅱ、ⅢおよびⅣは引張側の抵抗を無視して行った。

各状態ごとの支持荷重における、発生応力度と設定強度との比率を図-11に、各コンクリート強度において発生する応力度の一覧を表-4に示す。

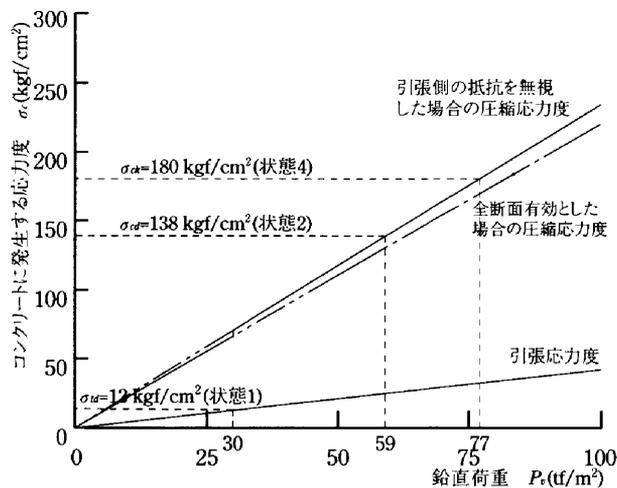


図-10 原設計のコンクリート応力度

表-3 各状態ごとの支持荷重

単位： $\text{tf/m}^2$ (MPa)

応力状態	状態Ⅰ	状態Ⅱ	状態Ⅲ
支持荷重	30 (0.29)	59 (0.58)	77 (0.76)

(3) 二次覆工 (t=20cm, 鉄筋補強) の構造検討

二次覆工 (t=20cm, 鉄筋補強) に (1) の検討結果から得られた支持荷重を作用させた時に発生する断面力に対して、鉄筋で補強した場合の検討を行った。

鉄筋は、施工可能であると思われる位置 (d=13cm, d=15cmの2とおり) にD13@200で配筋することとした。

なお、応力度の算定時には状態Ⅰは全断面有効とし、また状態Ⅱ,ⅢおよびⅣは引張側の抵抗を無視して行った。

各状態ごとの応力度算定結果を図-12に示す。

(4) 二次覆工 (t=20cm) の構造の決定

検討結果をまとめると以下のとおりとなった。

①無筋構造の場合

断面内に引張クラックを許容しない状態Ⅰの場合には、設計基準強度が $\sigma_{ck}=1000\text{kgf/cm}^2$  (98.1MPa) 程度のコンクリートを用いる必要があることが分かった。また、引張クラックを許容して、断面内のコンクリート圧縮応力度に着目した状態ⅡおよびⅣの場合には、設計基準強度が $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  (39.2MPa) 程度のコンクリートを用いる必要があることが分かった。

②鉄筋補強構造の場合

鉄筋による補強を行った場合、コンクリートの応力度

表-4 各コンクリート強度ごとの発生応力度

状態Ⅰ：鉛直荷重 30tf/m<sup>2</sup>(0.29MPa)

単位：kgf/cm<sup>2</sup>(MPa)

設計基準強度	180 (17.7)	240 (23.5)	300 (29.4)	900 (88.3)	1000 (98.1)
設計引張強度	12 (1.18)	16 (1.57)	17 (1.67)	36 (3.53)	38 (3.73)
圧縮応力度	106 (10.4)	108 (10.6)	110 (10.8)	116 (11.4)	117 (11.5)
引張応力度	26 (2.55)	28 (2.75)	30 (2.94)	37 (3.63)	38 (3.73)
判定	N.G.	N.G.	N.G.	N.G.	O.K.

状態Ⅱ：鉛直荷重 59tf/m<sup>2</sup>(0.58MPa)

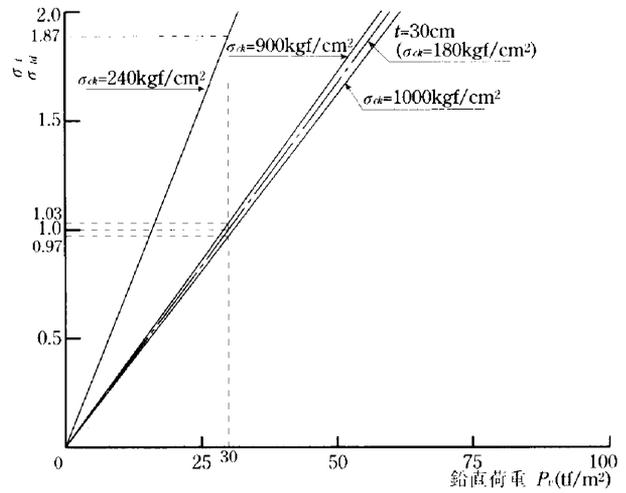
単位：kgf/cm<sup>2</sup>(MPa)

設計基準強度	180 (17.7)	240 (23.5)	300 (29.4)	400 (39.2)
設計圧縮強度	138 (13.5)	185 (18.1)	231 (22.7)	308 (30.2)
圧縮応力度	227 (22.3)	235 (23.0)	244 (23.9)	252 (24.7)
判定	N.G.	N.G.	N.G.	O.K.

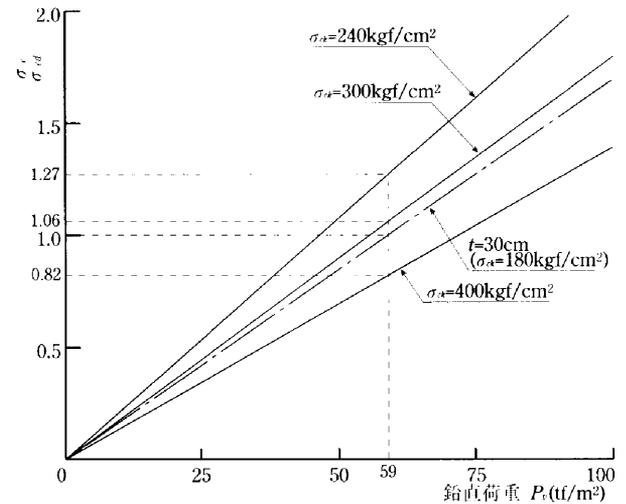
状態Ⅳ：鉛直荷重 77tf/m<sup>2</sup>(0.76MPa)

単位：kgf/cm<sup>2</sup>(MPa)

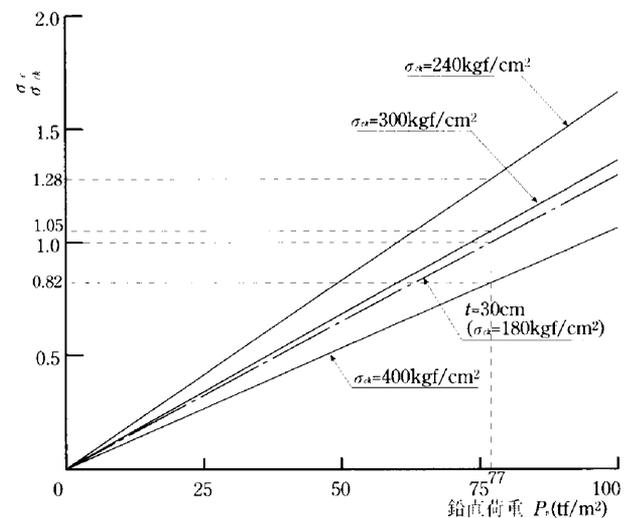
設計基準強度	180 (17.7)	240 (23.5)	300 (29.4)	400 (39.2)
圧縮応力度	295 (28.9)	306 (30.0)	316 (31.0)	327 (32.1)
判定	N.G.	N.G.	N.G.	O.K.



状態Ⅰ



状態Ⅱ



状態Ⅳ

図-11 発生応力度と設定強度の比率

状態Ⅰ：鉛直荷重 30tf/m<sup>2</sup> (0.29MPa)

単位：kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)

		無筋コンクリート	鉄筋コンクリート (D13 @200)	
応力分布図				
応力度	$\sigma_{c\ max}$	117 (11.5)	117 (11.5)	117 (11.5)
	$\sigma_{c\ min}$	-38 (-3.73)	-38 (-3.73)	-38 (-3.73)
	$\sigma_s$	—	79 (7.75)	5 (0.49)
必要強度 $\sigma_{ck}$		1000 (98.1)	1000 (98.1)	1000 (98.1)

状態Ⅱ：鉛直荷重 59tf/m<sup>2</sup> (0.58MPa)

単位：kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)

		無筋コンクリート	鉄筋コンクリート (D13 @200)	
応力分布図				
応力度	$\sigma_{c\ max}$	252 (24.7)	252 (24.7)	248 (24.3)
	$\sigma_{c\ min}$	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
	$\sigma_s$	—	69 (6.77)	290 (28.4)
必要強度 $\sigma_{ck}$		400 (39.2)	400 (39.2)	400 (39.2)

状態Ⅲ：鉛直荷重 77tf/m<sup>2</sup> (0.76MPa)

単位：kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)

		無筋コンクリート	鉄筋コンクリート (D13 @200)	
応力分布図				
応力度	$\sigma_{c\ max}$	327 (32.1)	326 (32.0)	322 (31.6)
	$\sigma_{c\ min}$	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)
	$\sigma_s$	—	73 (7.16)	359 (35.2)
必要強度 $\sigma_{ck}$		400 (39.2)	400 (39.2)	400 (39.2)

図-12 鉄筋補強応力度照査結果

を低減するどころか、逆に増加する傾向にあることが分かった。これは、施工可能位置に配筋した場合、応力状態が引張となる領域に配筋できないため、鉄筋が有効に作用していないためであると考えられた。

したがって、鉄筋補強をした場合には、コンクリートの強度も増加させる必要があるため、有効な補強とはならないことが分かった。

### ③本検討の結論

対象区間の二次覆工は、圧縮強度の大きいコンクリートを使用することが望ましいと考えた。このとき、引張クラックを許容しない場合には、非常に大きな設計基準強度が必要となる。このため、有効断面が最低でも1/2を確保できる範囲内でクラックの発生を許容し、コンクリート強度を $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  (39.2MPa) とすることがふさわしいと考えた。

## § 4. 実施工への反映

巻厚20cmの断面で引張クラックを許容した場合には、 $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  (39.2MPa) のコンクリートを用いることによって、巻厚30cmの断面と同等の耐力となることが分かった。しかし、コンクリートにクラックを許してしまうことは、トンネル構造物の長期の安定を考えた場合には好ましくないと考えた。そこで、SFRC (鋼繊維補強コンクリート) の適用を考えた。SFRCが従来のコンクリートに比べて優れている点は、以下のとおりである。

- ①ひび割れに対する抵抗性が大きいこと。
- ②ひび割れが生じた後も繊維が引き抜かれつつ外力に抵抗するため、材料として靱性が大きいこと。
- ③コンクリートの引張強度、曲げ強度、圧縮強度ならびにせん断強度が改善されること。
- ④凍結融解作用に対する抵抗性が著しく高いこと。
- ⑤耐摩耗性が高いこと。

とりわけ、ひび割れ発生後の引張変形特性は非常に優れていると言える。一旦発生したクラック幅の拡大を抑制する効果があるとともに、クラックを分散させる効果が期待できるものと考えた。図-13にSFRCの引張応力度-ひずみ曲線の例を示す。

これを踏まえて、実施工においては $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  (39.2MPa) のコンクリートに鋼繊維を0.8%混入したSFRCを使用した。

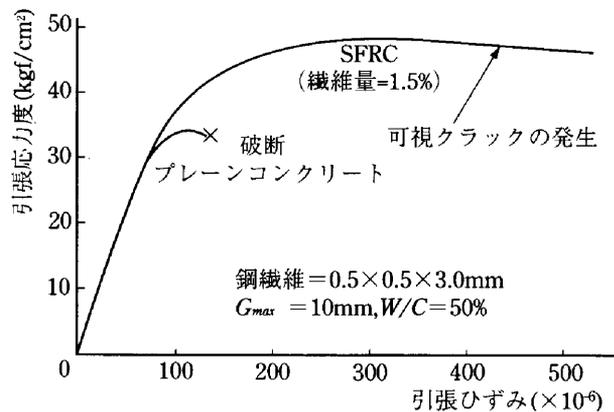


図-13 SFRCの引張強度-ひずみ曲線の例

## § 5. おわりに

鍋立山トンネルは、昭和48年12月に工事を開始して以来、途中工事中断期間が約3年あったが、竣工までに21年間という非常に長い時間を要した。膨張性泥岩の押し出し、小さな地山強度比、高圧の潜在ガス等の厳しい地山条件は、施工開始前にはだれも予測できなかったと思われる。

長い年月の間に行われてきた数えきれないほどの闘いの最終局面である縫い返しおよび二次覆工打設等の作業も無事完了し、平成9年3月21日に北越北線の1番列車が通過した。しかし、国土有効利用の面から見れば、このような困難を伴うトンネルの施工は今後も回避できない課題であると考えられる。

最後に、本工事の設計・施工にあたって御指導、御尽力を頂いた日本鉄道建設公団の方々をはじめ、関係各位に深く感謝する次第である。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説コンクリート構造物，平成4年。
- 2) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説鋼・合成構造物，平成4年。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編，平成3年。
- 4) 日本トンネル技術協会：スチールファイバーコンクリートに関する調査研究報告書，昭和55年。
- 5) 西松建設株式会社：北越北線鍋立山トンネル工事記録，平成8年。
- 6) 西松建設株式会社：北北，鍋立山T(中)他6，本坑支保縫返し施工計画，平成6年。
- 7) 西松建設株式会社土木設計部：本坑切り上げ断面における支保部材の検討，昭和63年。