

(88) 二次覆工省略条件の研究

— 吹付けコンクリートの応力解析 —

(財) 鉄道総合技術研究所 朝倉俊弘

○ (財) 鉄道総合技術研究所 松本吉雄

金沢工業大学

土屋 敬

Study on Conditions to Save Inner Lining

— Analysis of Shotcrete Stress —

Toshihiro ASAKURA, Yoshio MATSUMOTO,

Railway Technical Research Institute

Takashi TSUCHIYA, Kanazawa Institute of Technology

Abstract

Inner lining of tunnels constructed by NATM in mountain area is considered to be a kind of the so-called dressed lining.

The purpose of this paper is to determine the conditions that enable inner lining to be saved.

In this paper we summarize the results of a stress analysis of shotcrete applied as permanent lining:

- 1) In hard rock tunnels 10cm roughness makes shotcrete stress 9~23% larger.
- 2) Stress of shotcrete when sprayed smooth is lower than when sprayed uniformly to a constant thickness.
- 3) Shotcrete stress in the analysis supposing a full face excavation method is not a tensile but a compressive stress.

1. はじめに

NATM (New Austrian Tunnelling Method) は、昭和50年代初めにヨーロッパより導入され、以来、多くの施工実績が蓄積されてきている。昭和61年には土木学会「トンネル標準示方書(山岳編)」¹⁾が、NATMを標準工法として全面改訂されるなど、我が国の山岳トンネルの標準工法として位置づけられるに至っている。

鋼製支保工と木矢板により地山荷重を支保する従来のトンネル施工法では、覆工コンクリートは主要な支保メンバーであるのに対し、NATMでは、吹付けコンクリート・ロックボルト・鋼製支保工等の支保部材により地山は安定化され、膨張性地山等の特殊地山を除けば、二次覆工(覆工コンクリート)は、いわゆる化粧巻として位置づけられており、条件が整えば省略することが可能と考えられる。

旧国鉄盛岡工事事務所の試算²⁾では、複線トンネルにおいて、吹付けコンクリート厚を増して、二次覆工を省略することにより、全体工事費の約10%が節減できるとしており、かなりの経済効果がある他、工期短縮効果も期待できる。

本報告は、良好な地質条件下における二次覆工省略の可能性を検討したものであり、吹付けコンクリートの応力解析結果を中心に述べる。

2. 安全性評価のための二次覆工の機能

山岳部の鉄道トンネルにおけるNATMの二次覆工機能として、以下の事項が考えられる。

- ① 化粧巻として : トンネル内の美観のため
- ② 安全率の向上 : 一次支保に加え、安全率に余裕をもたせるため
- ③ 耐力部材として : 膨圧地山等で、一次支保のみでは地山が安定しない場合
- ④ 保守上の機能 : トンネル検査がやりやすく、漏水防止にもなる
- ⑤ 諸設備の保持 : き電線、照明器具、電力・通信ケーブル等の保持

二次覆工には、上記のように多様な機能があり、したがって二次覆工の省略は、このような機能が吹付けコンクリートによって代替しうる場合に限られると考えられる。

二次覆工の力学的機能を検討するための実測例として、中央本線塩嶺トンネルと福塩線八田原トンネルの例がある。

塩嶺トンネルでは、膨圧地山における覆工厚の妥当性の検証のため覆工コンクリートの応力測定が行われ³⁾、覆工打設までに18cm程度の内空変位が生じた断面において、圧縮側で最大 150×10^{-6} 、引張側で 100×10^{-6} 程度のひずみが測定されている。

八田原トンネルは、堅硬な花崗岩地山のトンネルで、トンネル中間付近と坑口付近の覆工応力の差異を見るため測定を行っており⁴⁾、温度変化の少ないトンネル中間付近では応力変化がほとんどなく、温度変化の大きい坑口付近では、温度変化に応じた応力変化が測定されている。

これらの測定結果から、地質条件による覆工の力学的機能の違いが分る。すなわち、NATMにおける二次覆工は、塩嶺トンネルのように大きな変位の生じる地山では、上記③の耐力部材として力学的機能を果たし、八田原トンネルのように変位が殆どない良好な地山においては、②の安全率の向上のために用いられていることが分かる。

3. FEMによる吹付けコンクリートの応力解析

吹付けコンクリートの作用効果については諸説あるが、土木学会標準示方書では、①岩盤との付着力、せん断力による抵抗、②曲げ圧縮または軸力による抵抗、③外力の配分効果、④弱層の補強、⑤被覆効果、の5項目に分類されている。これらの機能のうち、力学的機能に関わる吹付けコンクリートの支保能力としての付着強度については桑原ら⁵⁾、水谷ら⁶⁾、Furka トンネル⁷⁾の研究成果があり、押し抜きせん断強度についてはFernandezら^{8), 9)}、水谷ら^{10), 11)}の研究成果がある。

本報告では、掘削開放応力によって生じる吹付けコンクリートの曲げ圧縮または軸力による抵抗、並びに施工上生じる掘削面の凹凸の吹付けコンクリート応力に与える影響を、FEM解析により検討する。

(1) FEM解析プログラムの必要機能

鉄道総研所有のFEMプログラム(NATMFEM¹²⁾)は、これまで多くの鉄道トンネルの解析に適用してきた。NATMFEMでは、吹付けコンクリートのモデル化は、トラス要素、ビーム要素(弾性体要素)として扱ってきた。これらのモデルは吹付けコンクリートを軸力部材、曲げ部材としてそれぞれ評価しているが、ある長さを持つ単一弾性体として扱っており、局部的なクラックの発生等による非線形的な挙動を表現していない。吹付けコンクリートの曲げによる破壊、及びその進展も表現できるよう吹付けコンクリートを面要素(破壊接近度法による非線形要素)で表現し、かつ引張破壊を考慮してNo-tension機能¹³⁾を追加した。

(2) 機能のチェック

改良機能の検証は、鉄道技研で過去に行った1/10模型の載荷試験結果¹⁴⁾と照合することにより行った。シミュレーション結果を図1に示す。破壊モード、破壊発生位置を良くトレースしている。

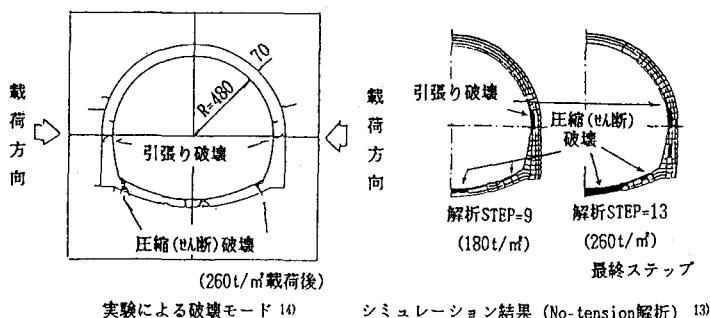


図1 実験と解析結果の比較

(3) パラメーター・スタディ¹⁵⁾

土被り、地山条件の違いによる吹付けコンクリートに発生する応力の検討を、吹付けコンクリートを面要素（非線型弾性体）、並びにビーム要素（吹付け厚が20cm以下の場合）として扱い考察した。解析は全断面掘削による発生応力と（新幹線トンネル全体をモデル化）、施工上生じる凹凸の影響を（掘削壁面の凹凸を部分的にモデル化）検討した。

(a) 全断面掘削工法による発生応力の検討

解析ケースは二次覆工省略が可能と思われるNATM設計・施工指針（案）¹⁶⁾ 岩分類IV_N、V_N以上を対象にした。これまでの研究成果と対応させるため土屋¹⁷⁾による分類に従い、R5, R7 について行い、参考としてR4を追加した。解析ケースを表1に示す。

表1 全断面掘削工法による解析ケース

ケース	地山条件	単位体積重量 γ (tf/m ³)	*一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	吹付け厚さ (cm)	土被り (M)			
					50	80	150	600
CASE-1	R 4	2.2	20.3	20	○	○	○	
CASE-2	R 5	2.3	48.2	10	●	●	●	
CASE-3				20	● ○	● ○	● ○	
CASE-4	R 7	2.5	25.4	5		●	●	●

注) ●: 吹付けをビーム要素で扱う（弾性体） ・ ・ 厚さが20cm未満のケース

○: 吹付けを面要素で扱う（非線型弾性体） ・ ・ 厚さが20cmのケース

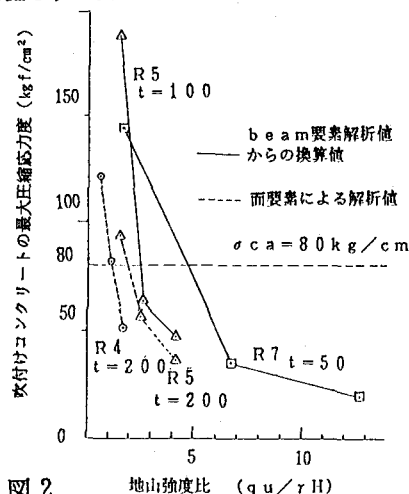
$$q_u = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad c$$

解析の結果、吹付けコンクリートに発生する応力は全て圧縮応力となり、引張応力は発生しなかった。新幹線断面は円形に近い形状のため均質な岩盤においてある程度の厚さをもつ吹付けコンクリートは、軸力部材として機能するといえる。また解析結果を地山強度比と、後述する補正を行った吹付けコンクリートの最大発生応力との関係を整理すると、図2となる。

(b) 施工上生じる凹凸の影響

トンネル掘削においては、地質条件により大小の差はあるが施工上掘削面に凹凸が生じる。特に、二次覆工省略の可能性が期待される硬岩地山においては、掘削面の凹凸は避けられない。そこで吹付けコンクリートに発生する応力への凹凸の影響を考察するため、以下に示す解析を行った。

仕上げ状態よりモデルを次の二つとした。



モデルA：表面凹凸仕上げ（掘削面の凹凸に合わせ、一定の厚さで吹付ける）

モデルB：表面平滑仕上げ（掘削面の凹部を埋め平滑に仕上げる）

荷重は前記解析結果におけるトンネル壁面の応力発生を考慮し、部分モデル側方からその分布に合わせて節点力を該当する節点を与えた。

（検討条件）

- | | | | | |
|---------------|-------|--|-------|---------------------------|
| i) 凹凸の程度 | ・凹凸間隔 | 40 cm | ・凹凸高さ | 10 cm |
| ii) 吹付けコンクリート | ・厚さ | 20 cm | ・弾性係数 | 34000 kgf/cm ² |
| iii) 地山 | ・解析地山 | R4, R5, R7（地山変形係数 2000, 10000, 3000kgf/cm ² ） | | |

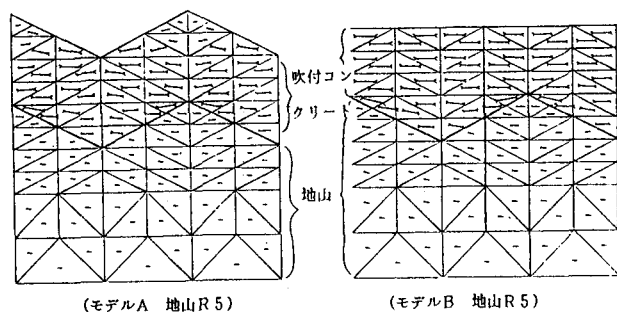


図3 凹凸モデルの解析結果（応力分布）

図3、4より、凹凸仕上げ（モデルA）にモーメントの発生がみられ、地山との付着が取れないような状況においては曲げ破壊モードも考えられる。平滑仕上げ（モデルB）では圧縮応力が断面に平均的に生じており、圧縮部材として働いている。

以上の結果から、吹付けの破壊モードを決定する要因としては地山と吹付けとの付着状態（付着強度の大きさ）が大きく影響するといえる。また、吹付けコンクリートを軸力部材として有効に働かせるためには、吹付けコンクリートの表面を平滑に仕上げるのが良いといえる。

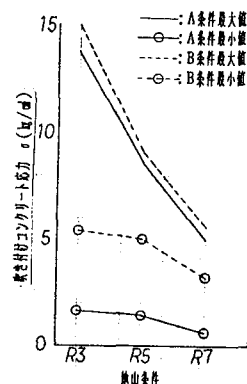


図4 吹付けコンクリートの最大応力と最小応力

4. 二次覆工省略条件の検討

二次覆工省略が可能となるための条件として、(1)気象条件、(2)地質条件、(3)地形条件等を検討する必要がある。そこで、現時点で想定しうる二次覆工省略条件を検討し、過去に施工されたトンネルに適用した場合、どの程度の施工延長が二次覆工を省略することが可能か試算した。

(1) 気象条件：寒冷地における吹付けコンクリートの凍害の危険性を避けるため、長谷川¹⁶⁾の凍害危険度が「0」の地域（コンクリートの凍害の可能性のない地域）を省略可能範囲と想定した。

(2) 地質条件：トンネル掘削時の挙動が弾性的で、掘削面が安定していることが条件となるため、NATM設計・施工指針（案）¹⁶⁾の岩盤分類A、CのIV_N、V_Nが省略可能条件と想定した。

(3) 地形条件：坑口付近は斜面安定、耐震等の観点から二次覆工は必要と考えられること、土被りが小さい場合はトンネル上部の開発の可能性があること、等から土被り2D以上（D：トンネル掘削幅）を省略可能条件と想定した。

トンネル計画段階では、上記(1)～(3)が対象となる。トンネル施工段階では上記に加え、(4)切羽状態と(5)変位計測が判断材料として加わる。

(4) 切羽状態：NATM設計・施工指針（案）に示される切羽観察記録様式において、切羽の状態＝1（安定）、素掘面の状態＝1（自立）、湧水＝1 or 2（なし～滴水程度）を省略可能条件と想定した。

(5) 変位計測：一次支保及び地山が安定状態と判断できる変位量を設定することは難しい。ここでは、N

A T M設計・施工指針（案）で、施工管理のための内空変位量の目安値を複線トンネルで $\Pi_N \sim V_N$ が50mm以下としており、これを参考にして $u/D < 0.005$, $\delta_v/D < 0.001$ を省略可能条件として想定した。（ u :内空変位量、 δ_v :初期変位速度、 D :トンネル掘削径）

(1)～(5)の想定条件を、TDB（トンネルデータバンク）¹⁹⁾に蓄積された実績データに適用したところ、計画段階のデータでは73トンネル52kmのうち14トンネル7km（約13%）が二次覆工省略可能と判定され、施工実績データからは、20トンネル9km（約18%）が省略可能と判定された。

上記仮想判定から、1) 覆工省略可能区間の連続性がかなりよいこと（二次覆工を打設すべき区間が断続的であると作業能率が悪く、覆工を省略する効果がなくなる）。2) 計画段階では、地山分類基準が判定項目として有効であること。3) 施工段階では、素掘面の状態が重要であること等が分かった。

しかしながら本作業は、仮想判定条件に基づいたものであり、その妥当性や現場における適用性については、今後検討する必要がある。

5. 今後の課題

鉄道トンネルの本坑において、二次覆工を省略するためには、列車走行と関わりのない斜坑・横坑等の作業坑で試験的に採用し、実施工上の問題点を解決しておく必要がある。

主な問題点は以下のとおりである。

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| (1) 掘削時の切羽地質の評価法 | (4) 局所的な地質不良箇所の補強方法 |
| (2) 吹付けコンクリートの品質管理・施工管理 | (5) 検査、補強等の保守上の実務的諸問題 |
| (3) 局所的な湧水処理方法 | |

実務的諸問題については、実トンネルにおいて試験工事を行い、具体的に解決策を見出していくことが重要であるといえる。また、諸外国の覆工省略トンネルの保守実態も調査する必要があると考える。

〔参考文献〕

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説、1986
- 2) 国鉄盛岡工事事務所：第41回国鉄トンネル研究会資料、1987
- 3) 白木博昭、他：膨張性地山におけるNATM二次覆工の応力測定、土木学会第38会年講、第3部、1983
- 4) 西日本旅客鉄道株式会社（部内資料）
- 5) 桑原啓三、他：道路切り取り面の安定に関する調査、土木研究所資料、第1935号、1983
- 6) 水谷敏則、他：吹付けコンクリート薄肉覆工の支保機能に関する実験的研究日本トンネル技術協会、トンネル技術講演会、1984
- 7) Amberg, R. et al.: Der Furka-Basistunnel, Der Furka-Basistunnel sonderdruck No.24, 1982.
（邦訳：フルカ長大トンネル、トンネル新技術に 関する海外文献集、日本トンネル技術協会、1984）
- 8) Fernandez-Delgado, G. et al.: Structural Behavior Of Thin Shotcrete Liners Obtained From Large Scale Tests, Shotcrete Conference, 1976
- 9) Fernandez-Delgado, G. et al.: Thin Shotcrete Linings in Loosening Rock RETC, Proceedings、1979
- 10) 水谷敏則、他：吹付けコンクリート薄肉覆工の支保機能に関する実験報告(1)土木研究所資料第2049号、1984
- 11) 水谷敏則、他：吹付けコンクリート薄肉覆工の支保機能に関する実験報告(2)土木研究所資料第2154号、1984
- 12) 土屋敬、他：トンネル設計用プログラムの開発とその解析事例、鉄道技術研究報告、No1351、1987
- 13) 土屋敬：数値解析によるトンネルの長期安定性の評価報告書、委託研究報告 1988
- 14) 吉川恵也、他：トンネルの耐震補強に関する研究、鉄道技術研究報告、No1322、1986
- 15) 土屋敬：吹付けコンクリート応力のパラメータスタディに関する研究、委託研究報告、1989
- 16) （財）鉄道総合技術研究所：NATM設計・施工指針（案）、1987
- 17) 土屋敬：ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究、鉄道技術研究報告 No1342、1987
- 18) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報、XXIX 1975
- 19) 朝倉俊弘、他：トンネルデータバンクシステムの開発、鉄道技術研究報告 No1335、1987