

膨張性地山における覆工の設計手法

Design method of lining in the squeezing ground

山本 和義¹⁾, 平野 宏幸²⁾, 江戸川 修一³⁾ 豊原 正俊⁴⁾, 長谷川 雅彦⁵⁾

Kazuyoshi Yamamoto, Hiroyuki Hirano, Tetsushi Edogawa, Masatoshi Toyohara Masahiko Hasegawa

Behavior to which the tunnel is pushed out internally is occasionally shown at Fault part of Mesozoic-Paleozoic layer, Fault part of addition body at mesozoic and Argillaceous rock at Neogene period in mountain tunnel. Such a natural ground is called a so-called expansive ground. A lot of researches on the generation mechanism are performed for an expansive ground. There is a hypothesis that the swelling property is caused so that underground water may flow in the expanding opening and a big transformation is brought.

This thesis is lucky and discusses the technique by which load which acts for the long term is assumed when we encounter expansive natural ground, and secondary lining which has dynamic function designs reasonably.

Key Words: Expansive ground, Lining, Displacement speed, FEM analysis, Release of in-situ stress rate

1. はじめに

山岳トンネルの、中古生層の断層部や中生代の付加体の断層部、新第三紀の泥質岩では、大きな土圧が作用し、トンネルが内側に押し出されるような挙動を示す場合がある。このような地山をいわゆる膨張性地山と称している。膨張性地山に関しては、その発生機構などについて多くの研究がなされている。近年では、膨張した開口に地下水が流入し、膨潤性を生じ大きな変形をもたらすなどの説も出されている。本論文は、このような膨張性が発生する機構を研究するのではなく、膨張性地山に遭遇した場合に、長期的に作用する荷重を想定し、力学的機能を有する覆工を合理的に設計する手法について論じたものである。

2. 検討手順

対象としたトンネルは、古第三紀の安山岩、凝灰岩の互層からなる地質であり、断層帯がトンネル軸線と鋭角に交差するため、数百mにも及ぶ断層帯の施工を余儀なくされた。この断層帯では変位が 500mm を越えるところも生じた。断層のマトリックスの粘土分の強度は 0.1N/mm^2 程度であり、土被りが 400m 程度あることから地山強度比は 0.1 以下の非常に小さい値となっている。覆工の検討は縫い返しを行った区間である。この区間は、鋼製支保工 H-150~200 吹付けコンクリート 20~25cm、ロックボルト $L=3\text{m}$ 、14 本が当初支保で、縫い返し時には同等の支保を用いた。なお、変形を抑制する目的で、インパートのストラッド H-200 と吹付け 20cm を行っている。

検討は、まず、周辺地盤の変形特性を推定するため、計測された変位をもとに逆解析を行い、等価変形係数を求めた。次に、変位-切羽距離曲線より最終変位量を予測した。この現在の計測値と最終変位量の差が今後覆工に作用する土圧であると仮定している。この最終変位量までの増分は、支保の剛性のみを考慮した増分であり、覆工の

-
- 1) 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第二部
 - 2) 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第二部
 - 3) 正会員 清水建設(株) 北陸支店
 - 4) 日本鉄建公団 北陸新幹線第二建設局
 - 5) 正会員 日本鉄建公団 北陸新幹線第二建設局

剛性を考慮した変位の増分ではない。したがって、支保の状態で応力解放率をパラメータとして解析を行い、支保状態での変位増分に見合う応力解放率を定めた。この状態で FEM の順解析で覆工をモデル化して解析を行い、FEM で得られた覆工の変位を骨組み解析で強制変位として与えることにより、部材断面力と回転角を求めた。これをもとに鋼繊維補強コンクリートの配合を定め、限界状態設計法で覆工の設計を行った。鋼繊維補強としたのは、覆工厚さは 30cm であり、通常の鉄筋コンクリートではかぶりや純間隔に無理が生じると判断したからである。

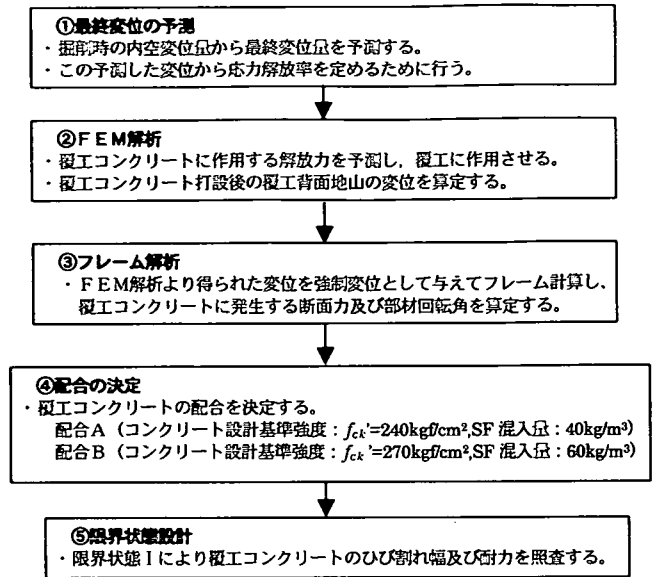


図-1 膨張性地山の覆工設計フロー

3. 最終変位の推定

図-2 と図-3 に縫い返し前と縫い返し後の変位発生状況の 1 例を示す変位は経過時間で整理しているが、変位速度が大きいことが認められる。最大は 60mm/日程度、最小でも 20mm/日程度発生している。

一般に、縫い返しの場合、最初の掘削により応力の再配分が生じるため、縫い返し時には大きな変形が生じないことが多い。しかしながら、本トンネルのように大きな変形を受け、トンネルの周囲に 10m におよぶ塑性領域が生じている場合には、縫い返し後にも 150mm を越える変位が測定され、さらにその変位は、明確な収束が認められず、クリープ的に時間とともに変位が増加することが認められた。この状況を評価すると、1ヶ月に 1mm 以下を 2 回確認したら収束と見なして良いという基準でも、開業後の保守管理まで考慮した場合には問題があると判断した。このような現象は特に粘土化している破碎帯では、応力の再配分によって生じた接線方向応力と半径方向の応力が時間経過とともに粘土のクリープにより接線方向の応力が緩和され、半径方向の応力増加につながると想定される。また、完全に粘土化されていない破碎帯でも、破碎帯に存在する岩石はスレーキング性が顕著であり、1 日の水浸により完全にもとの形状を失い土砂化するような状況である。このような地盤の場合には、トンネル掘削による亀裂の開口に水が徐々に浸透することにより地山の耐荷力が失われ、変形は長期的に継続する可能性が高いと判断した。そこで、縫い返し後の変位をもとに最終変位の予測を行った。変位の予測に当たって

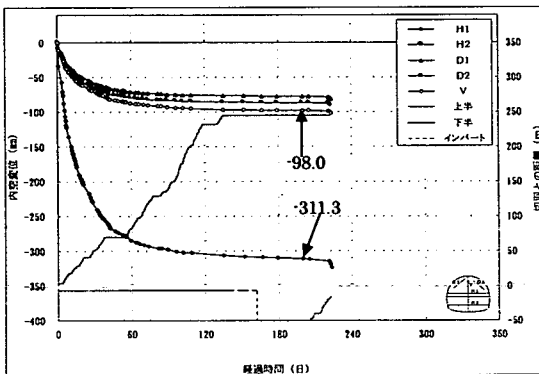


図-2 代表的な変位曲線 (縫い返し前)

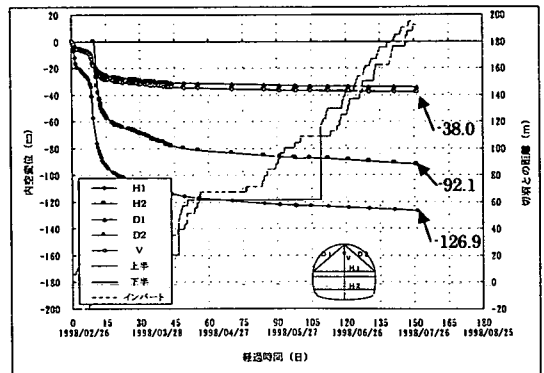


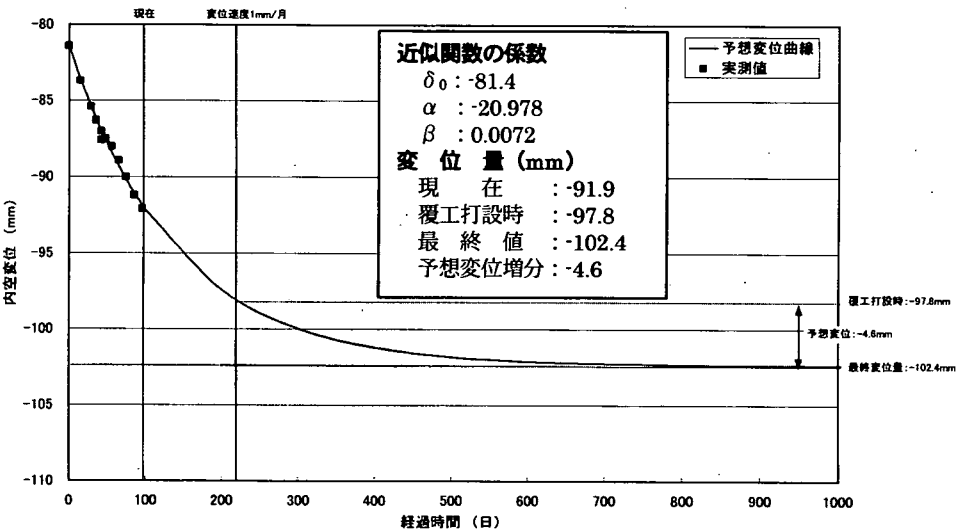
図-3 代表的な変位曲線 (縫い返し後)

は、式－１に示すもので行った。

$$\delta_t = \delta_0 + \alpha (1 - e^{-\beta \cdot t}) \dots \dots \dots (式-1)$$

ここに δ_t : 時間 t 経過した時の変位置
 δ_0 : 弾性変位置
 α : クリープ変位置
 β : 収束関数
 t : 時間

この関数を用いて、最小二乗法により α 、 β を推定した。図－４に推定した曲線を示す。これはある断面の縫い返し後の上半の水平測線を示したものである。この曲線は現在の変位は 91.9mm であり、覆工打設可能な時（１ヶ月 1mm 以内）になるまで、約 97.8mm まで変位が増加するということである。また、覆工打設後も変位は増大し、最終的には約 102.4mm まで変位が増大することを意味している。ただし、この変位増分は、支保工の状態での変位増分であり、覆工打設後の変位増分ではない。したがって、覆工に作用する荷重を推定し、覆工構造を骨組み解析で設計するため、FEM の順解析を行うこととした。



図－４ 変位予想曲線（指数関数近似）

4. 順解析および骨組み解析

順解析するにあたって、物性値の評価が最も重要である。逆解析結果から、ある程度の地山物性値は推定できるが、支保の作用効果や地盤の非線形性を考慮する必要がある。まず、逆解析とボーリングデータから地山の物性値を推定し、この推定した物性値を用いて縫い返しに至るまでの経過を順解析により、解析値と計測値の同定を行う。このことによって次の解析の妥当性を検証するものである。同時に縫い返しによって発生した新たな変位についても同様に覆工打設前の変位の同定解析を行う。その後最終変位の推定から得られた変位増分（覆工打設後の変位増分）に適合するように、覆工をモデル化しないで再度同定解析を行う。この目的としては、指数関数で予測している最終変位はあくまで覆工の無い状態を予測したものであることによる。このようにして得られた変位をもとに、応力解放率を設定した。次に覆工をモデル化した状態で、残りの応力を解放させ覆工の変位置を FEM 解析によって推定した。

表－１に解析結果の一例を示す。

表-1 FEM解析結果一覧

区 間	天端沈下 V(mm)		上半水平変位 H1(mm)		下半水平変位 H2(mm)	
	解析値	計測値	解析値	計測値	解析値	計測値
前 旧 復	-123.7	-98.0	-239.0	-311.3	—	—
復旧後	+16.0	-38.0	-147.2	-126.9	-102.4	-92.1
最終値までの変位増分 (二次覆工無し)	+1.1	-0.5	-9.4	-7.3	-7.6	-4.6
最終値までの変位増分 (二次覆工の剛性考慮)	+0.1	—	-5.6	—	-3.8	—

骨組み解析はこのようにして得られた変位を強制変位として作用させることで、断面力の算定を行った。骨組み解析結果の断面力を図-5と図-6に示す。

基本ケース 1: 強制変位
縮尺 1/100
曲げモーメント図 応力スケール : 3.22 t/m 最大値 : -3.22 t/m

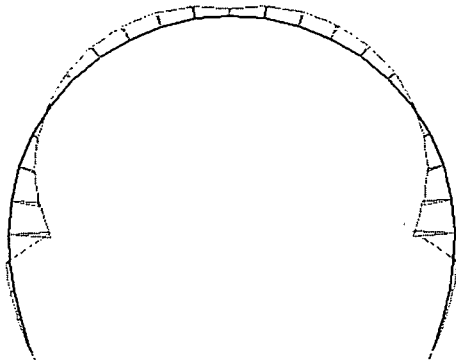


図-5 骨組み解析結果（モーメント図）

基本ケース 1: 強制変位
縮尺 1/100
軸力図 応力スケール : 1.38 t/t 最大値 : 1.38 t/t

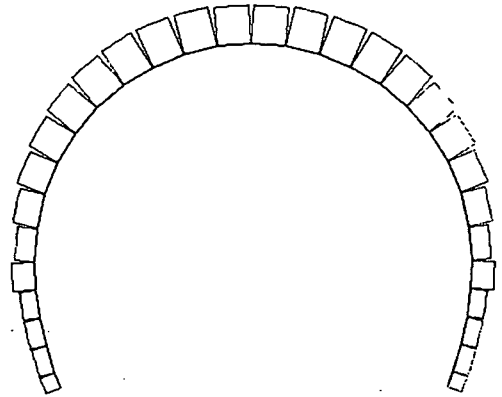


図-6 骨組み解析結果（軸力図）

6. 断面設計

断面設計では、覆工厚さが30cm（一般のトンネル覆工厚さ）しかなく、鉄筋による補強は困難であると想定し、鋼繊維補強コンクリートで対処することとした。鉄筋代替としてトンネルの二次覆工にSFRCを採用するものとし、限界状態設計法に基づいてその仕様を決定する。

鋼繊維補強コンクリート部材の限界状態は、次の3種類が考えられている。

- ① 限界状態Ⅰは、対象となる覆工体の長期にわたる耐久性を確保する観点から定めた限界状態である。
- ② 限界状態Ⅱは、軸圧縮力と曲げを受ける部材の所要の部材耐力を確保すると同時に、鋼繊維補強コンクリートの变形特性を評価する観点から定めた限界状態である。
- ③ 限界状態Ⅲは、覆工体が地山の大変形に追従できる鋼繊維補強コンクリート部材の变形特性を評価する観点から定めた限界状態である。

覆工の設計に当たっては、当然長期的な耐久性が問題となることから、限界状態Ⅰで設計することとした。

設計に用いる配合として、表-2に示す通り、鋼繊維混入量を 40kg/m^3 と、 60kg/m^3 の2種類を考慮し、それぞれの設計基準強度は 24N/mm^2 と 27N/mm^2 とした。曲げ強度は本来試験練りにて設定するものであるが、今回は過去の実績より設定した。

表-2 覆工設計で検討した配合

	SF 混入率 (%)	設計基準強度 f_{ck}' (N/mm ²)	設計圧縮強度 f_{cd}' (N/mm ²)	設計引張強度 f_{tfd}' (N/mm ²)	覆工厚 h (cm)
配合A	0.50	24.0	18.5	1.4	30
配合B	0.75	27.0	20.8	1.8	30

解析から得られた覆工の断面力を耐力照査した結果の1例を図-7に示す。耐力照査の結果、全体的に曲げモーメントが卓越し軸力が小さいものとなっており、無筋コンクリートでは覆工の耐力を確保できないことがわかる。また、SFRCを採用した場合でも、配合Bでなければ、覆工の耐力を確保できない結果となった。これは、変形が水平方向に卓越したことが原因の一つであると考えられる。

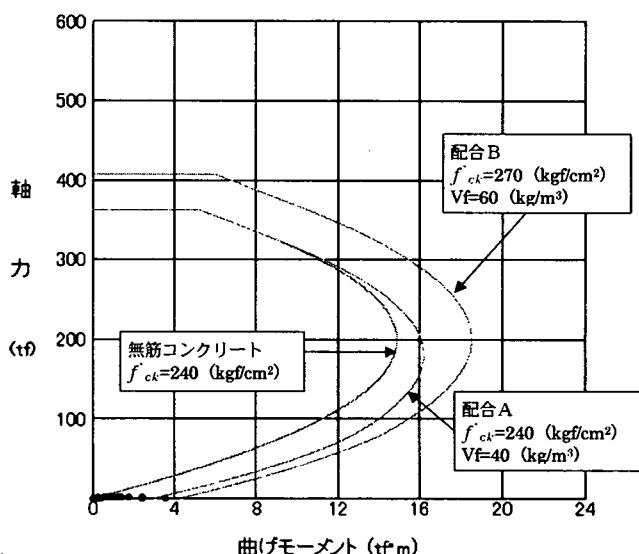


図-7 N-M 性能曲線

7. 計測結果と評価

以上のように、トンネルが大変形を受け覆工にも荷重が作用することが予想されたので、覆工にも力学的機能を有する設計を行った。この妥当性を検証するために覆工の応力計測と変位計測を実施した。ただし、応力計測は1断面で実施している。変位計測結果では、覆工打設後の変位が大きいと予測した区間で、覆工の内空変位が増大し、覆工打設後90日で3.1mmに達した。一方、応力計測から得られる曲げモーメントは、左からの偏圧を受けており、右肩部と左側壁部に曲げモーメントが集中している。設計時には、このような偏圧挙動を示しておらず、偏圧を想定することが困難であった。よって、設計時に覆工に作用すると予想した曲げモーメントは左右対称であり、計測から得られる曲げモーメントは異なる分布になった。しかし、モーメントの最大値は、計測値が4.80tに対して解析値は3.22tと近い値になっており、符号も肩部が正、側壁部が負の値となっている。偏圧していることを除けば、ほぼ同等の曲げモードであることがわかる。

一方、軸力の計測値は、天端は例外としてほぼ40~50tの等分布になっている。しかし、数値解析から得られる軸力は1.38tとオーダーの異なる値となってしまっている。これは、数値解析ではインポートコンクリートを施工していないことを考慮し、覆工脚部をスライド支持で想定していたために軸力が作用しない結果となったからである。実際は覆工の脚部はほぼ固定状態になっており、軸力が大きく作用したと考えられる。今後は、設計時にインポートを施工していない場合の覆工脚部の取扱いに留意が必要であることを示すものである。

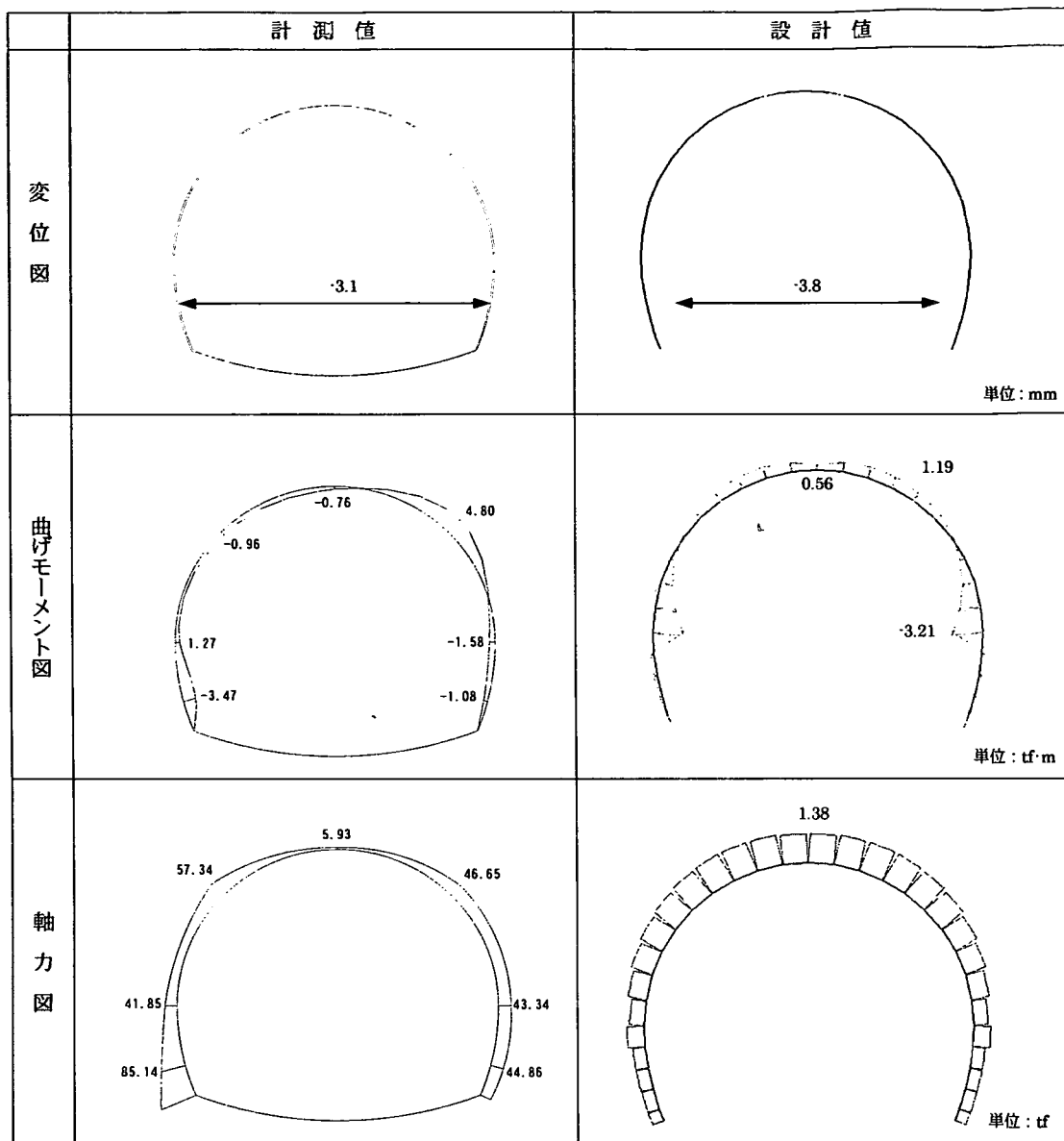


図-8 計測値と設計値の比較

8. まとめ

トンネルにおける覆工は、力学的機能を付加させる場合と付加させない場合に大別できる。力学的機能を付加させる場合の1つとして、地山の変形が収束しない場合に、トンネルに必要な拘束力を与えるとしている。しかしながら、未固結地山での土圧や防水トンネルにおける水圧は比較的外力が把握しやすいのに対して、変形が収束しない場合の覆工に作用する外力、設計手法については具体的に示されていなかったのが実状である。本論文では、大変形を受ける膨張性地山に対して、その一次支保状態での最終変位の予測、予測した最終変位量のFEMによる再現応力解放率の設定と、覆工打設後の変位の予測、予測された変位による断面設計を示した。また、覆工打設後の計測とも照査を行っている。計測値との照査では、端部の支持状態に再考の余地があるものの、ほぼ、想定した結果となった。本手法は、今後変位が収束しない場合の覆工設計の1手法として有効であると考えられる。