

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

Prepare of the nomogram for simple design of the secondary lining in squeezing ground

伊藤 隆¹⁾・越智 修¹⁾・小山 昭²⁾・長谷川達也³⁾・永田 章³⁾

Takashi ITOH, Osamu OCHI, Akira OYAMA, Tatuya HASEGAWA and Akira NAGATA

In the tunnel located in squeezing ground, convergence of displacement may not be completed, before constructing secondary lining. For this reason, load may act on lining, after constructing secondary lining. In such a case, the design method which does not exceed the proof stress of secondary lining is required. At present, the method by frame analysis is widely used for the design method of secondary lining. In this report, we prepared the nomogram without performing frame analysis, and examined the applicability to design.

Key Words : tunnel, design, secondary lining, squeezing ground, nomogram

1. はじめに

膨張性地山を対象とするトンネルでは、二次覆工打設前までに変位が収束せず、二次覆工打設後も覆工に荷重が作用する場合がある。このような場合、二次覆工に将来作用することが予想される荷重（以下、将来荷重）を推定し、永久構造物として十分な耐力を有することを照査することが必要である。

現在のところ、二次覆工の設計方法としては、フレーム解析等によって覆工に生じる断面力を算定し、耐力を照査する方法が一般的である。本報告は、フレーム解析等を用いずに、設計をより簡易に行うためにノモグラムの作成を行い、膨張性地山において、その適用性について検討したものである。

2. ノモグラムの作成

2.1 ノモグラムの概要

ノモグラムは、将来荷重算定式より推定した将来荷重（水平荷重 P_x 、鉛直荷重 P_y ）を図中にプロットすることで、荷重条件に当てはまる二次覆工の仕様を決定するものである。図-1に二次覆工設計の流れを示した。ノモグラムは、各断面毎にフレーム解析等の方法で設計を行っていた二次覆工の設計を簡略化することを目的として作成するものである。

1) 正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室

2) 日本鉄道建設公団 設計技術室

3) (株)ダイヤコンサルタント 関東支社 東京支店

本報告では、新幹線標準断面を対象として二次覆工設計のためのノモグラムを作成し、東北新幹線岩手トンネルで得られた内空変位測定結果より推定した将来荷重を用いて、ノモグラムによる設計法の適用性について検討を行った。将来荷重の算定手法には、従来から検討を進めてきた7手法の中から、算定値が実測値と比較的一致した3手法の算定式を用いた。図-2にノモグラムの作成例を示す。ノモグラムは、図に示すように、ある地山条件において将来荷重 P_x , P_y の組合せから適用すべき覆工タイプの適用範囲を示したものである。

2.2 ノモグラム作成の条件

ノモグラムは、多数のフレーム解析で求めた覆工の限界荷重により作成する。ノモグラム作成の条件は以下のとおりである。

(1) 解析モデル

二次覆工のモデルには、「NATM設計施工指針」¹⁾による新幹線標準断面を対象とし、膨張性地山を想定したI_s断面（二次覆工厚30cm、インバート厚45cm）を基本として、隅角部に内径150cmのRをつけたモデルとした。

図-3に本解析で用いたフレーム解析モデルを示す。なお、限界荷重算定のための応力照査は、二次覆工に対応した格点1~29について行った。

(2) 荷重条件

ノモグラム作成に用いる荷重として、水平荷重 P_x と鉛直荷重 P_y の比（荷重比 P_x/P_y ）による複数の荷重パターンを設定した。荷重比は過去の膨張性地山における実績値を参考に $P_x/P_y=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の5種類とした。したがって、今回のノモグラムの適用範囲は荷重比が $0.5 < P_x/P_y < 3.0$ の範囲に限定される。

2.3 地山条件

ノモグラムを作成する地山の变形係数は、過去に行った分析事例と「NATM設計施工指針」¹⁾による標準値(表-1)を参考に变形係数50000, 100000, 200000(kN/m²)の3種類とした。

表-1 地山等級に応じた標準値¹⁾

計算上の 地山等級		単位体積 重量 γ (kN/m ³)	初期変形 係数 D_0 (kN/m ²)	粘着力 c (kN/m ²)	内部 摩擦角 ϕ (°)	初期ポ アソン 比 ν_0	弾性限 界 R_{el}	非線型 パラメ ータ n	備考
未固結 砂質土	S_1	16	20000	20	30	0.35	1.0	2	N値 10~30 相当
	S_2	18	50000	20	35	0.35	1.0	2	N値 30~50 相当
	S_3	20	100000	20	40	0.35	1.0	2	N値 50 以上相当
岩 類	R_1	19	50000	70	25	0.30	0.3	4	軟岩
	R_2	20	100000	50	30	0.30	0.3	4	軟岩
	R_3	21	200000	300	35	0.30	0.3	4	軟岩
	R_4	22	500000	500	40	0.30	0.3	4	中硬岩
	R_5	23	1000000	1000	45	0.30	0.3	4	中硬岩
	R_6	24	2000000	2000	50	0.25	0.2	6	硬岩
	R_7	25	5000000	4000	55	0.25	0.2	6	硬岩
	R_8	26	10000000	6000	55	0.25	0.2	6	硬岩

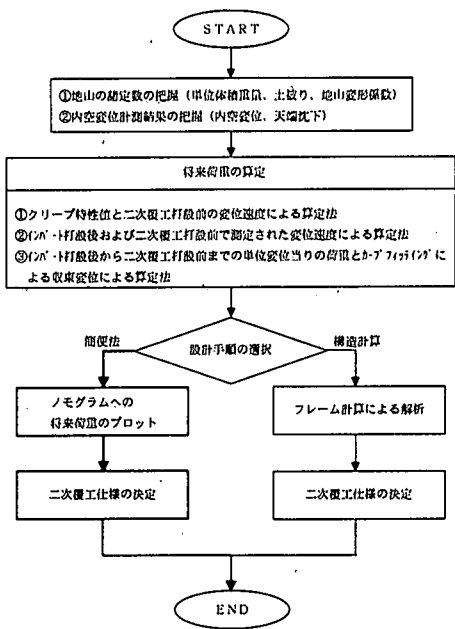


図-1 二次覆工の設計手順

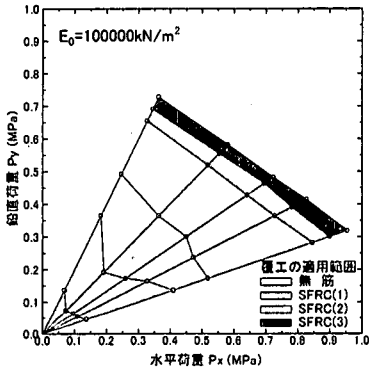


図-2 ノモグラムの作成例

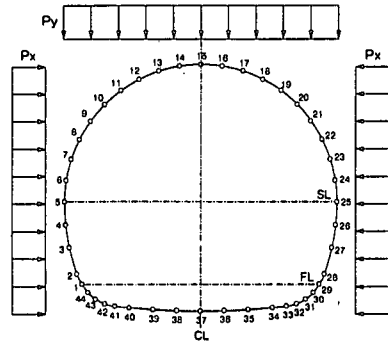


図-3 フレーム解析モデル

2.4 入力物性値

(1) 二次覆工

解析に用いた二次覆工の種類は、無筋コンクリート 1 種類(設計基準強度 18000kN/m²)、鋼繊維補強コンクリート (以下 SFRC) 3 種類(設計基準強度 24000kN/m²; 引張強度 1000, 2000, 3000kN/m²) の計 4 種類とした。

解析モデルで用いた二次覆工の諸元を表-2 に示す。

表-2 二次覆工の緒元

覆工タイプ	厚さ(cm)	設計基準強度(kN/m ²)	引張強度(kN/m ²)	単位体積重量(kN/m ³)	変形係数(kN/m ²)
無筋	30	18000	—	23.5	2.2×10 ⁷
SFRC (1)	30	24000	1000	24.0	2.5×10 ⁷
SFRC (2)	30	24000	2000	24.0	2.5×10 ⁷
SFRC (3)	30	24000	3000	24.0	2.5×10 ⁷

表-3 地山のばね定数

変形係数 E ₀ (kN/m ²)	覆工外径 D ₀ (cm)	覆工変形量 δ (cm)	ばね値 K _n (kN/m ²)
50000	1010	0.5	105000
100000	1010	0.5	209000
200000	1010	0.5	418000

(2) 地山のばね定数

周辺地山の変形係数に対応するばね定数は下式²⁾を用いて算定し(表-3), 解析モデルの全周に配置してフレーム解析を行った。なお, 覆工の変形量 δ=0.5cm はトンネル半径の約 0.1% として設定した。

$$K_n = \frac{1}{12} \cdot E_0 \cdot D_0 \cdot \left(\frac{1}{4} \right) \cdot \delta \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \dots (1)$$

E₀ : 地山の変形係数 (N/cm²)
D₀ : 覆工外径 (cm)
δ : 覆工の変形量 (cm)

2.5 照査方法

軸力が全周で一定であれば、曲げモーメントが最大の箇所のみで照査できるが、膨張性地山の解析では軸力がばらつくため、二次覆工の全周(格点 1~29)を対象とした曲げモーメント M、軸力 N の照査を行う必要がある。各二次覆工タイプの限界荷重は、格点の M、N を二次覆工の耐力力線図上にプロットし、その中の少なくとも 1 点が耐力力線に接したときの荷重として定めた(図-4 参照)。ノモグラムは、同一荷重比での各覆工タイプの限界荷重を結び、覆工の適用可能範囲を求めたものである。

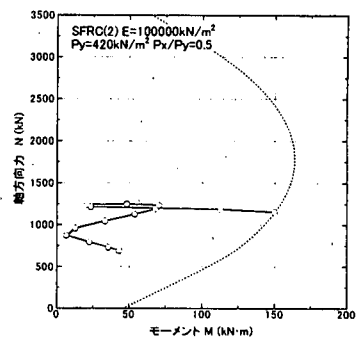


図-4 耐力力線図へのプロット例

2.6 計算結果

図-5 にノモグラムの作成結果を示した。図中、無筋の適用範囲よりも荷重の小さな範囲にも SFRC の適用を必要とする範囲があるが、これは軸力が小さいために、低軸力領域で曲げモーメントが耐荷重力線を越えることによるものである。

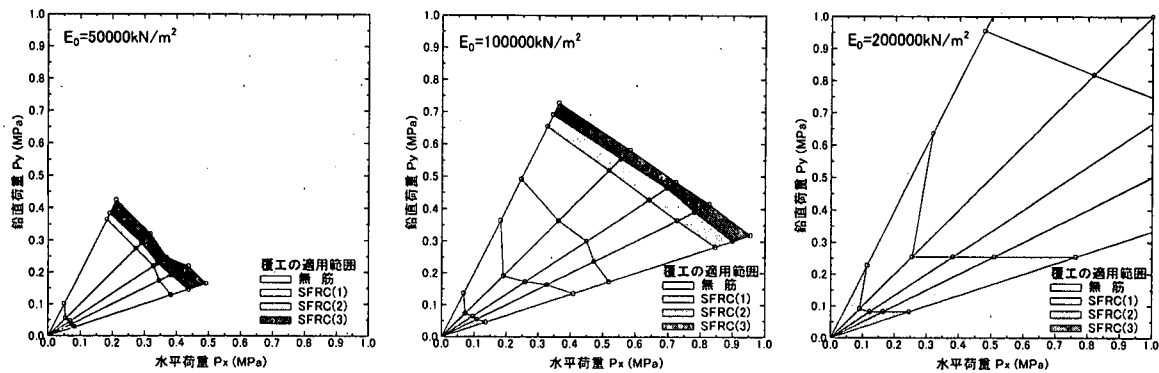


図-5 ノモグラムの作成結果

3. ノモグラムによる設計例

3.1 将来荷重算定手法

将来荷重の算定には、過去の算定手法の検討結果³⁾より、実測値に比較的合致した以下の3手法を用いた。

(1) 手法－1：クリープ定数と二次覆工打設直前の変位速度から将来荷重を算出する方法

平面ひずみ状態を仮定した円孔掘削の弾性理論解より側圧係数 K_0 と変形係数 D_e を求める。弾性理論解の式は以下の通りであり、弾性変位量（側壁変位 $\theta=0^\circ$ ，天端変位 $\theta=90^\circ$ ）を代入することにより解くことができる。

$$U_a = (1 + \nu) \cdot a \cdot \frac{P_y}{D_e} \cdot \left[\frac{K_0 + 1}{2} + (3 - 4 \cdot \nu) \cdot \frac{K_0 + 1}{2} \cdot \cos 2\theta \right] \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 U_a は掘削壁面の半径方向変位量、 P_y は初期地圧、 ν はポアソン比、 a はトンネル半径である。将来荷重を算定する段階では、(2)式を時間で微分し、二次覆工直前の変位速度をパラメータとして算定するものである。なお、 K_0 および D_e は、変位算定のための定数値であり、フレーム解析に用いる値とは異なる。

(2) 手法－2：2時点で測定された変位速度から将来荷重を算出する方法

平面ひずみ状態を仮定した将来荷重 P_x と変形速度 V の関係は次式で表すことができる。

$$P_x = \frac{D_e}{(1 + \alpha)} \cdot \frac{1}{\beta \cdot a \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{1}{\left\{ \frac{K_0 + 1}{2} + (3 - 4 \cdot \nu) \cdot \frac{K_0 + 1}{2} \right\}} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで α ：粘性倍率、 β ：遅延係数(1/day)である。このうち、 α 、 β 、 a 、 ν 、 K_0 は時間的に大きく変化しないものとし、これらを含んだ項を合わせて定数 A とする。これにより、 $P = A \cdot D_e \cdot V$ と簡略化できる。インバート打設時および二次覆工打設時について(3)式を当てはめ、 $A \cdot D_e$ を消去し将来荷重を求める。この際、内空変位、天端沈下の計測値の二時点間の増分変位をフレーム解析による変形モードを適合させる逆解析により、将来荷重を算出する。

(3) 手法－3：単位変位量当りの荷重とカーブフィッティングによる方法

インバート打設から二次覆工打設までの内空変位を再現するようにフレーム解析による逆解析を行い、内空変位を再現した荷重と実測変位から単位変位量当りの荷重を算出する。次に、二次覆工打設以降の変位をカーブフィッティングにより予測し、内空変位が収束するまでの変位増分と先に求めた単位変位量当りの荷重との積をとることにより将来荷重を算出する。

3.2 岩手トンネルにおける将来荷重の推定

ノモグラムによる設計を行うに先立ち、前記の3手法を用いて将来荷重の推定を行った。図－6に岩手トンネルの549k968m地点および550k390m地点の内空変位測定記録を示した。3手法による将来荷重の算定結果を表－4に示した。

なお、550km390m断面の手法－1では鉛直荷重が0MPaとなっている。これは、変位速度を算定する範囲内で天端沈下が増加しなかったために沈下速度が0となったことによる。

表－4 将来荷重一覧表

将来荷重 算定手法	549km968m 地点		550km390m 地点	
	水平荷重 P_x (MPa)	鉛直荷重 P_y (MPa)	水平荷重 P_x (MPa)	鉛直荷重 P_y (MPa)
手法－1	0.749	0.288	0.945	0
手法－2	0.128	0.075	0.234	0.217
手法－3	0.307	0.179	0.121	0.111

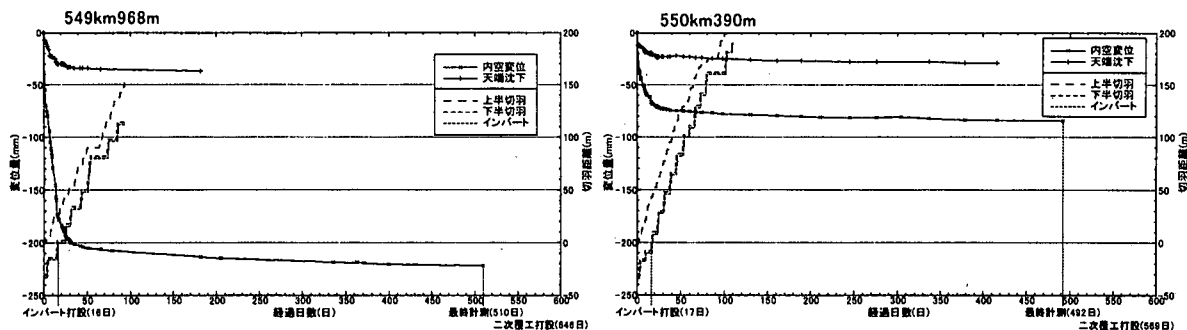
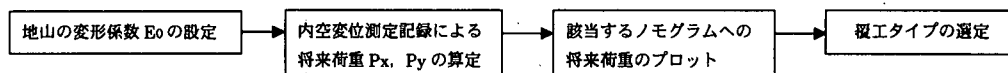


図-6 内空変位計測データ(東北新幹線岩手トンネル)

3.3 ノモグラムによる設計例

ノモグラムによる二次覆工の設計は以下の手順となる。



本報告で設計例として挙げた岩手トンネルにおいては、それぞれ以下のノモグラムを選定した。

549km968m(地山の変形係数 129000 kN/m²) → 変形係数 100000 kN/m² のノモグラム

550km390m(地山の変形係数 190000 kN/m²) → 変形係数 200000 kN/m² のノモグラム

表-4 で得られた将来荷重をそれぞれ図-7 中にプロットし、該当する二次覆工の仕様を選定した。この結果を表-5 に示した。結果的には、3 手法のうち 2 手法は同等の選定結果となったが、各手法による将来荷重にばらつきがあるため、必ずしも同一の結果を得ることができなかった。

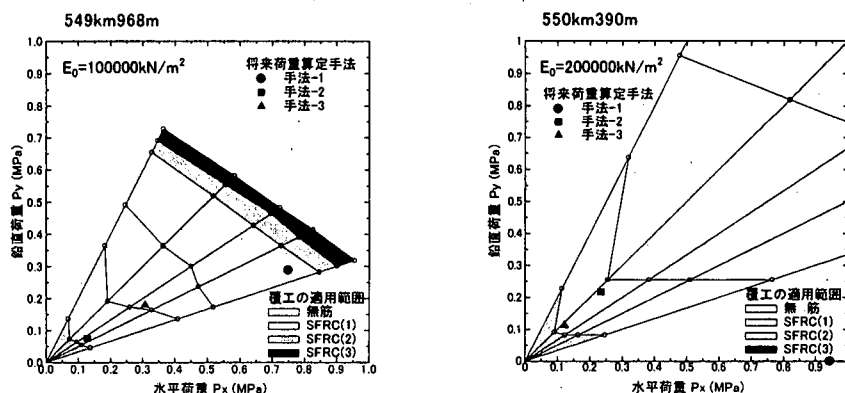


図-7 ノモグラムによる二次覆工選定図

表-5 ノモグラムによる二次覆工選定結果

将来荷重 算定手法	549km968m 地点	550km390m 地点
手法-1	SFRC(1)	適用外
手法-2	SFRC(1)	SFRC(1)
手法-3	無筋	SFRC(1)

4. ノモグラムによる設計例とフレーム解析による設計例の比較

ノモグラムは多数のフレーム解析で求めた限界荷重によって作成するため、ノモグラムによる設計方法とフレーム解析による設計方法は本来同一のものである。しかし、ノモグラムは作成数が限定されるため、かならずしも地山の変形係数に適合するノモグラムが利用できるとは限らない。ここでは、ノモグラムによる設計例とフレーム解析による設計例を比較して、判定結果の相違について検討した。

フレーム解析による設計例とノモグラムによる設計例による二次覆工の選定結果の比較を表-6に示した。なお、今回の例ではSFRCの引張り強度を1000, 2000, 3000kN/m²の3種類に限定したため、フレーム解析による設計でも判定のための耐荷力線は同じものを用いた。

本報告では、549km968m地点で用いるノモグラムに、フレーム解析で用いた地山の変形係数よりも小さな変形係数 $E_0=100000\text{kN/m}^2$ のノモグラムを、また、550km390m地点に用いるノモグラムに、フレーム解析に用いた地山の変形係数よりも大きい変形係数 $E_0=200000\text{kN/m}^2$ のノモグラムを用いた。

地山よりも変形係数の小さなノモグラムを用いた549km968mの選定結果では、手法-1でノモグラムによる判定結果がフレーム解析によるものよりも1ランク重い選定結果となり、安全側の設計となるが、手法-2および手法-3では逆に1ランク軽い選定結果となり、変形係数の小さなノモグラムを用いたにも関わらず、危険側の選定となった。これは地山の変形係数が小さくなると、各覆工の適用範囲の下限値も小さくなることによるもので、将来荷重のプロットが適用範囲の下限付近にある場合には、1ランク上の変形係数のノモグラムでも照査を行い、最終的な選定を行う必要がある。

一方550km390mの比較結果では、地山とノモグラムの変形係数がほぼ等しいこともあり、今回のノモグラムの適用範囲外となった手法-1を除くと同一の選定結果となった。

表-6 ノモグラムとフレーム解析による二次覆工選定結果の比較

将来荷重 算定手法	549km968m 地点			550km390m 地点		
	フレーム解析による 選定結果		ノモグラムによる 選定結果	フレーム解析による 選定結果		ノモグラムによる 選定結果
手法-1	無 筋	<	SFRC(1)	SFRC(2)		適用外
手法-2	SFRC(2)	>	SFRC(1)	SFRC(1)	=	SFRC(1)
手法-3	SFRC(1)	>	無 筋	SFRC(1)	=	SFRC(1)

5. まとめ

本報告では、ノモグラムの作成条件を数タイプに限定したため、フレーム解析とノモグラムによる二次覆工の選定結果に地山の変形係数の影響による相違がみられた。しかし、同等の変形係数で両者を比較した場合には同じ選定結果が得られたことから、荷重比 P_x/P_y およびノモグラムを作成する地山の変形係数をより密にすることで、設計に利用可能な精度を持つノモグラムが作成可能と考える。

一方、今回の設計例で推定した二次覆工に作用する将来荷重は、各手法によってかなりのばらつきがみられ、課題を残した。これは、変位計測記録と想定したモデルが厳密には一致しないこと、変動のあるデータの一部を使うことなどの不確定な理由によるものとみられる。この将来荷重については、二次覆工部材に作用した軸力および曲げモーメントの計測値があり、今回の算定結果との比較を行っているが、手法-2がおおむね一致する結果を得ている。ただし、これはごく限られたケースでの結果であるため、各手法による将来荷重の算定結果の妥当性については、今後データ数をさらに蓄積して検討していきたい。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団. NATM設計施工指針, 1996.8
- 2) 日本鉄道建設公団. 併進工法設計施工指針(案), 1994.5
- 3) 北川, 登坂, 長谷川, 中川, 鈴木. 膨張性地山における二次覆工の設計. トンネル工学研究論文・報告集 第7巻 p153~p158, 1997.11,