

応力解放率に着目した山岳トンネル弾性有限要素法に関する研究

RESEARCH ON ELASTIC FEM FOR MOUNTAIN TUNNEL ANALYSIS IN RESPECT OF STRESS RELEASE RATIO

猪熊 明*・重田佳幸**

Akira INOKUMA, Yoshiyuki SHIGETA

Among the technical problems we meet when we use 2 dimensional FEM for the design of NATM tunnels, how to fix the input data is the most vital one. It includes physical property like Young Modulus, analysis space, initial stress, and stress release ratio to simulate the excavation.

This paper puts focus on stress release ratio, which has been conventionally fixed from empirical knowledge or from the idea to compensate the 3 dimensional reality. The authors think it more proper to fix the ratio from the factors ruling tunnel loosening pressure such as tunnel width and geological strength. To clear the stress release ratio and proper way to find the ratio, the authors have compared the analysis and measured data.

1. はじめに

従来山岳トンネルは、主に経験的な知見に基づく地山分類により設計されてきた。設計条件である地質が事前調査で十分把握できない山岳トンネルにあつては、地山分類は十分有効な設計方法であつた。しかし近年の解析、計測技術の発達、性能規定や限界状態設計法など他分野での設計法の見直しなどの状況を考えると、トンネル分野においても何らかのより合理的実用的な設計法を開発することが重要であると考えられる。新しい設計法は当面地山分類による設計法と共存できるような運用上の配慮をすれば、設計上の安全性についても急激な変化は少ないと考える。

こうした背景から実用上使い易いことを考えると、解析法としては二次元弾性有限要素解析もしくは骨組解析が適当である。骨組解析はシールドの設計等で用いられ信頼性の高い方法であるが、ロックボルトの解析ができないので、本研究は二次元弾性有限要素法に焦点を当てることとした。

二次元弾性有限要素法により山岳トンネルの設計を行うのに一番の技術的課題は、入力設定問題である。これには入力物性値、解析領域、初期応力など種々の問題があるが、応力解放率も大きい影響を与える要因である。支保工を打設した後の応力解放率は、実施工が三次元的であるということから三次元解析を基に定める場合もあるが、経験的に定める場合も多い。このため工事前の解析に対する信頼性はまだ多くの改良の余地があると言える。

本研究は、解析手法として最も単純な二次元弾性有限要素法を考え、山岳トンネル地盤解析に適用する際の応力解放率の設定問題に焦点を当て、解析結果と現場計測の比較により検討するものである。解析は支保建込み後の掘削相当外力もしくは応力解放率をパラメータとして計算を行い、掘削相当外力もしくは応力解放率を地山の良否やトンネルの寸法などトンネルのゆるみ土圧を支配する要因から合理的に設定できないかを明らかにしようとする。

* 正会員 建設省 土木研究所 新材料開発研究官

**正会員 (株)ダイヤコンサルタント 関東支社東京支店

2. 解析方法

2.1 解析の流れ

解析は、二次元弾性有限要素法を用いて山岳トンネルの支保部材の設計を行う際に用いる応力解放率に着目して行った。解析の流れは、図-1 に示すように、地盤物性および計測データを整理した後に、後述する手法を用いて変形係数を設定し、二次元弾性有限要素法によるパラメータスタディーを実施した。パラメータスタディーは、支保部材に作用する荷重を求めることを目的とし、エネルギー、内空変位、ロックボルト軸力および吹付けコンクリート応力のそれぞれの計測値と解析値が概ね一致するように応力解放率を同定するものである。なお、解析は、初期応力解析と支保工建込みの2ステップとし、掘削相当外力と初期土圧の比を応力解放率とした。また、エネルギーは(1)式により算出される便宜上の値である。

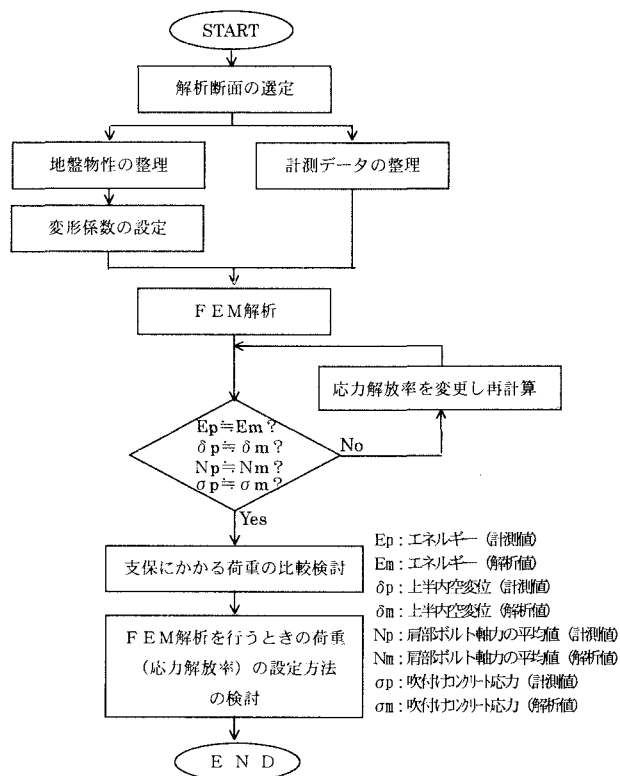
$$E = N \times u \quad (1)$$

ここで、 E ：エネルギー (kN・m)

N ：肩部ロックボルト軸力の平均値 (kN)

u ：壁面変位 (m)

($u = \delta/2$, δ ：上半内空変位)



E_p ：エネルギー (計測値)
 E_m ：エネルギー (解析値)
 δ_p ：上半内空変位 (計測値)
 δ_m ：上半内空変位 (解析値)
 N_p ：肩部ボルト軸力の平均値 (計測値)
 N_m ：肩部ボルト軸力の平均値 (解析値)
 σ_p ：吹付けコンクリート応力 (計測値)
 σ_m ：吹付けコンクリート応力 (解析値)

図-1 解析の流れ

2.2 解析条件

(1) 対象トンネル

解析に用いたトンネルの諸元を表-1 に示す。解析対象としたトンネルは、二車線高速道路トンネルと新幹線複線トンネルである。

表-1 解析対象トンネルの諸元

トンネル名	支保パターン	掘削外径 (m)		岩石名	地山等級	土被りH (m)	コアの一軸圧縮強度 (MPa)	上半内空変位 (mm)	肩部のロックボルト軸力平均値 (kN/本)	吹付けコンクリート応力 (MPa)	Vp (km/s)		亀裂の状態 (切羽観察記録による)
		幅B	高さH _t								事前	坑内	
C*	IV _N	10.2	9.07	安山岩溶岩	A	288	139.9	0.8	27.5	4.8	2.0	4.9	100~20cm, 部分開口
A	C _I	11.0	7.6	花崗岩	D _I	143	118.0	5.2	24.3	0.7	1.5	—	100~20cm, 部分開口, ランダム
T	D _I	11.1	8.9	凝灰岩	C _I	260	19.3	10.5	68.5	0.9	2.5	—	100~20cm, 開口, 層状, 板状
U	II _N	10.3	8.41	凝灰角礫岩	A	128	34.5	6.0	11.5	0.3	2.4	3.8	100~20cm, 密着, ランダム
O	C _I	11.0	7.6	凝灰岩	A	171	89.5	6.9	21.3	—	4.5	—	100~20cm, 開口, 層状, 板状
P	D _I	11.1	7.65	凝灰角礫岩	C _I	162	30.2	12.1	13.4	—	1.4	2.6	20~5cm, 開口, 層状, 板状
N	D _{II}	11.2	9.02	泥岩	D _I	126	7.2	104.6	114.7	21.9	1.9	—	亀裂なし
H	C _{II} -b2	12.0	8.95	泥岩	D _I	47	3.8	69.4	73.0	14.5	0.7	1.9	20~5cm, 部分開口, 層状

注) *: 鉄道トンネル, 無印: 道路トンネル

トンネル断面の選定条件は、①トンネル周辺にアーチアクションが形成されるような土被りを有していること。②支保パターンがB～D_I程度のトンネルであること。③大規模な補助工法が用いられていないこと。④A計測、B計測（特にロックホルト軸力）が実施されていることなどである。

(2) 入力物性値及び解析領域

解析に用いた変形係数は、図-2 に示す変形係数と内空変位の関係から(2)式、(3)式により求めた。

・全断面掘削の場合

$$D = \frac{0.75 \times (K_0 \cdot \gamma_t \cdot H \cdot B)}{\delta_{uc}} \quad (2)$$

・ショートベンチの場合

$$D = \frac{0.55 \times (K_0 \cdot \gamma_t \cdot H \cdot B)}{\delta_{uc}} \quad (3)$$

ここで、D : 地山の変形係数 (kN/m²)

K₀ : 初期側圧係数

γ_t : 単位体積重量 (kN/m³)

H : 土被り (m)

δ_{uc} : 上半内空変位 (m)

B : トンネル掘削幅 (m)

図-3 は、(2)式、(3)式より求めた変形係数を地山等級別にプロットしたものである。Aトンネルについては、対象断面で実施された一軸圧縮強度に比べ事前に実施した地山弾性波速度が低いいため他の傾向と整合がとれないが、それ以外のトンネルでは、地山の変形係数が地山等級毎にある幅をもって収まっていることがわかる。

単位体積重量は、試験結果の平均値(道路公団トンネルデータベースおよび日本鉄道建設公団トンネルデータベース)より設定した。また、ポアソン比は、岩種および変形係数を考慮し、NATM設計施工指針¹⁾を参考に設定した。

解析領域は、水平方向に 10D (D:トンネル掘削外径)程度、鉛直方向 6D程度を設定した。境界条件は、モデル側面については水平方向固定、鉛直方向自由とし、モデル底面については、水平方向および鉛直方向ともに固定とした。なお、モデル上面に土被りに応じた荷重を作用させた。

3. 解析結果と考察

3.1 応力解放率の設定

表-2 に解析結果を示す。図-4、図-5 には、支保に作用する掘削相当外力と初期土圧の比(応力解放率)と土被り高さおよび変形係数の関係について示す。また、図-6、図-7 には、掘削相当外力と Terzaghi の土荷重の比(外力、荷重はともに高さ換算)と土被り高さおよび変形係数について関係を示した。

土被り高さと応力解放率の関係(図-4 参照)をみると、相関係数が 0.05～0.44 と低くバラツキが大きい結果となった。変形係数と応力解放率の関係(図-5 参照)をみると、相関係数が 0.34～0.75 となり、土被り高さと応力解放率との関係より相関が高い結果となった。また、各項目別でみると、エネルギーとロックホルト軸力の相関係数は、0.7 以上であり高い

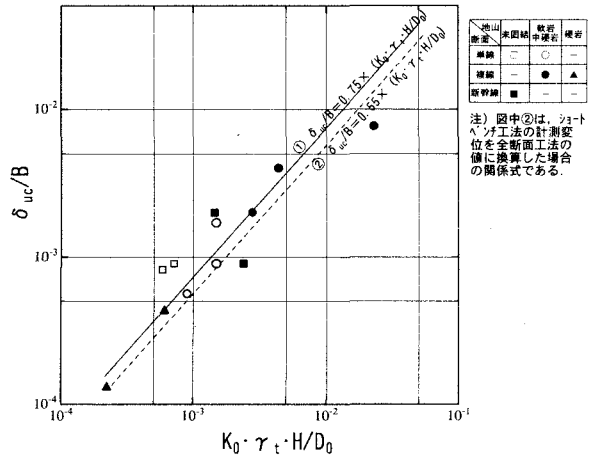
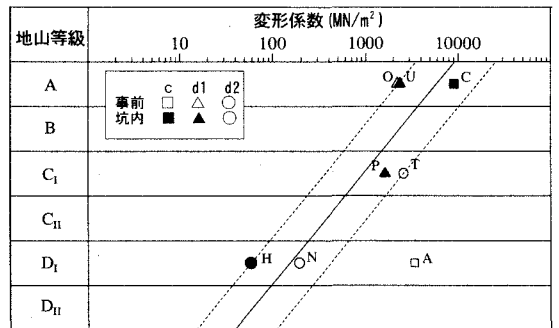


図-2 地山の変形係数と内空変位の関係¹⁾



注) 地山等級は、道路トンネル技術基準(技術編)²⁾、平成元年6月を参考とした。

凡例のc、d1、d2は、岩種を示す。

凡例の事前・坑内は、地山等級の区分に用いた弾性波速度測定の実施時期を示す。

図-3 地山の変形係数と地山等級の関係

相関が認められたものの、内空変位および吹付けコンクリート応力に関しては、0.4 程度の相関係数と相関が低い結果となった。

表 - 2 解析結果

トンネル名	岩石名	土被り H (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	変形係数 D (MN/m ²)	トンネル掘削幅 B (m)	支保に作用する土荷重等				
							Terzaghi の土荷重高さ ¹⁾ h (m)	掘削相当外力 / 初期土圧 (%) (掘削相当外力 (m))			
								エネルギー	内空変位	ロックボルト軸力	吹付けコンクリート応力
C	安山岩	288	25.9	0.25	10400	10.24	2.53 ③	87 (250.6)	126 (361.4)	62 (178.0)	126 (361.4)
A	花崗岩	143	25.9	0.25	3880	11.0	2.75 ③	30 (42.9)	49 (70.2)	26 (36.9)	15 (21.5)
T	凝灰岩	260	21.7	0.25	2950	11.1	3.28 ④	33 (85.8)	39 (102.4)	30 (78.0)	10 (26.0)
U	凝灰角礫岩	128	21.7	0.25	2680	10.3	2.58 ③	40 (51.2)	75 (95.7)	22 (27.6)	8 (10.2)
O	凝灰岩	171	25.6	0.25	2500	11.0	2.75 ③	32 (54.7)	59 (100.7)	15 (25.8)	—
P	凝灰角礫岩	162	24.7	0.3	1820	11.1	3.28 ④	15 (24.3)	39 (62.7)	5 (8.6)	—
N	泥岩	126	22.5	0.35	210	11.2	10.2 ⑥	33 (41.6)	74 (93.4)	14 (17.5)	73 (92.0)
H	泥岩	47	18.5	0.35	68	12.0	21.6 ⑦	53 (24.9)	110 (51.7)	37 (17.4)	99 (46.5)
平均値 (%)								33.7 ¹⁾	63.6 ²⁾	21.2 ²⁾	55.2 ³⁾

注) *1: 表中の③等は、Terzaghi の支保工に作用する土荷重の表における岩盤の状態を示す。
 *2: 計測値の内空変位量が小さい C トンネルを除いた平均値。
 *3: 6 トンネルの平均値。

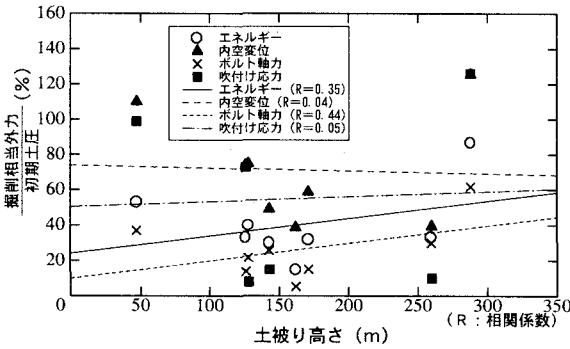


図-4 土被り高さと応力解放率の関係

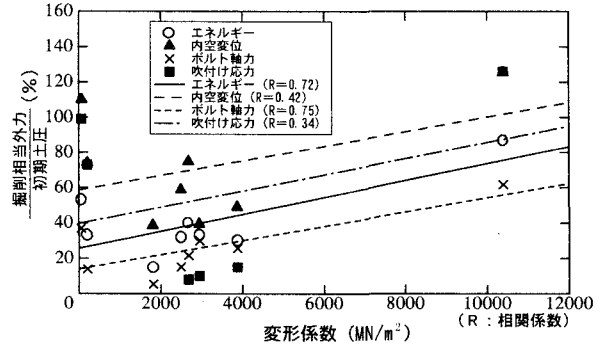


図-5 変形係数と応力解放率の関係

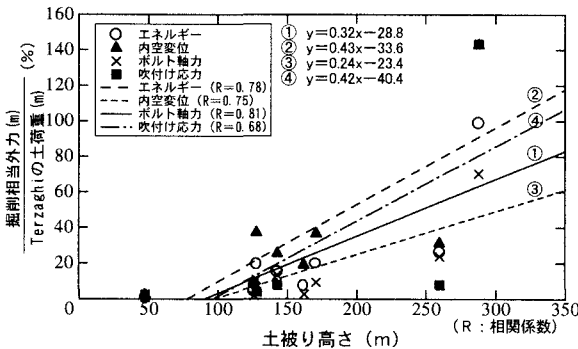


図-6 土被り高さと土荷重高さの比

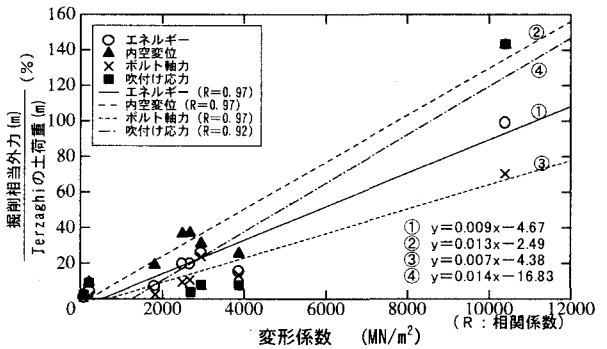


図-7 変形係数と土荷重高さの比

土被り高さ σ と土荷重高さ σ_0 の比の関係(図-6 参照)をみると、相関係数が 0.68~0.81 と高い相関が認められた。変形係数 μ と土荷重高さ σ_0 の比の関係(図-7 参照)をみると、相関係数が 0.92~0.97 と高い相関が認められた。

図-4~図-7 の内で最も相関が高いのは、図-7 の変形係数と土荷重高さ σ_0 の比の関係を示したものであり、相関係数は、0.92~0.97 であった。このことから、応力解放率の設定方法について図-7 の関係を用いる手法の可能性が考えられる。すなわち、地山条件から Terzaghi の土荷重を求め、図-7 の関係を用い、変形係数と Terzaghi の土荷重より掘削相当外力 σ_0 を求める。次に掘削相当外力 σ_0 と初期土圧 σ_0 から応力解放率を設定するというものである。ただし、本手法を機械的に適用すると、土被り高さ以上の土荷重を掘削相当外力に設定するような実際と乖離する面もあるため注意が必要である。

3.2 内空変位、ロックボルト軸力の推定と応力解放率

エネルギー、内空変位、ロックボルト軸力の計測値と解析値が一致するときの応力解放率は、パラツキが大きいものの内空変位(平均値 64%)、エネルギー(平均値 34%)、ロックボルト軸力(21%)の順に小さくなるという明瞭な差が認められた。この順番は、支保工の作用効果が発揮するまでの時間遅れと考えれば整合がとれる。

このことから、ロックボルトおよび吹付けコンクリート等の支保工建込み時の応力解放率を個別に設定することにより、ロックボルトおよび吹付けコンクリートの効果発現の時間的影響を考慮した解析が可能になるものと考ええる。

なお、吹付けコンクリート応力における応力解放率の同定結果についてみると、計測値が数 MPa 以上の場合は、内空変位の応力解放率とほぼ一致する傾向となっているが、1MPa 以下の場合は、応力解放率が 15%以下と小さな値となった。これは、前者の場合は、内空変位測定開始時と吹付けコンクリートの作用効果が発揮するときとが一致したことを意味しており、後者の場合は、初期材齢におけるクリープおよび乾燥収縮等の他の要因が大きく影響するので応力解放率に差違が見られたものと考えられる。

4. おわりに

本検討では、二次元弾性有限要素法によりエネルギー、内空変位、ロックボルト軸力、吹付けコンクリート応力の計測値と解析値が一致する場合の支保に作用する応力解放率に着目してパラメータスタディーを行った。その結果、変形係数と土荷重の比の関係をみると高い相関性が認められた。このことから、解析に用いる応力解放率の設定手法について1つの手法を示した。また、内空変位、ロックボルト軸力が一致するときの応力解放率の平均値を考察することにより支保工毎に応力解放率を変えれば、それらの推定精度が向上することも示した。ただし、検討したトンネル数が少ないため今後データを蓄積して再検討する必要があると思われる。

今回は、実測値の内空変位から変形係数を設定したが、事前設計に用いる変形係数の設定方法として図-3 に示したような地山等級および岩種別の設定方法の確立が望まれると同時に室内試験等の物性試験との関連性について追求していくことが重要と考える。

最後にデータの提供をしていただいた日本道路公団および日本鉄道建設公団の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団:NATM 設計施工指針, 平成 8 年 2 月
- 2) (社) 日本道路協会:道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 平成元年 6 月