

山岳トンネルの構造解析手法 に関する一考察

Consideration on analytical method in design of mountain tunneling

真下 英人¹・砂金 伸治²・木谷 努²

Hideto Mashimo, Nobuharu Isago and Tsutomu Kitani

¹正会員 博士(工学) (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

E-mail : mashimo@pwri.go.jp

²正会員 修士(工学) (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

This paper discusses the concept of load acting on tunnel support for design stage calculated by widely-used numerical analyses method for mountain tunneling. For simulating ground, finite element method (FEM) analysis and frame analysis were carried out to clarify the difference of two analyses about concept of load. Essential difference was not found in the result between FEM analysis and frame analysis with linear ground spring. Frame analysis with non-linear ground spring had the different concept of load from those two analyses. Proper usage of these analyses is recommended in this paper.

Key Words: tunnel, support, load, frame analysis, finite element method (FEM) analysis, ground spring

1. はじめに

現在、トンネル構造を対象とした数値解析では、有限要素解析 (FEM 解析) と骨組み構造解析 (フレーム解析) という2つの解析手法が実務に供されている。前者は、主として、掘削による地盤の変形や構造物への影響を算出するものとして技術が体系化されている。また、後者は主に、荷重によって覆工等の構造物に発生する断面力や応力を算出するものとして用いられている。しかし、両解析手法の境界は、実務上の使用性が優先されており、必ずしも明確にはなっていない。例えば、山岳トンネルに関して、支保工の応力算出には通常 FEM 解析が用いられるが、力学的機能を有する覆工の応力算定には骨組み構造解析が用いられるのが一般的である。

2つの解析手法の大きな違いは荷重と地盤のモデル化である。すなわち、FEM 解析では、荷重を掘削による応力解放と捉え、かつ、地盤を有限要素でモデル化している。一方、骨組み構造解析では荷重は

あくまでインプットした外荷重として捉え、かつ、地盤を地盤ばねでモデル化している。

トンネル構造の合理化が望まれている現在、数値解析に基づく力学的な設計法の確立が必要である。今後、トンネルの数値解析に基づく設計法を確立するためには、両設計手法における設計荷重値を体系化するだけでなく、両設計手法の荷重や地盤のモデル化に関する概念の違いを明確にしておくことが必要であると考えられる。

以上のような背景のもと、本研究は、山岳トンネルの支保工を対象とした FEM 解析、骨組み構造解析による簡単な試算により、両解析手法における荷重の概念および地盤とトンネル構造物との相互作用の考え方の違いについて考察を行うものである。

2. FEM 解析によるトンネル挙動

(1) FEM 解析の概要

まず、FEM 解析による地山および支保工の変形挙動を考察する。本論文では、簡単な例として、均質

な線形弾性地山内に円形トンネルが掘削される場合について解析する。解析は、図-1に示すように2段階に分けて行う。まず、図-1(a)のように step1 として、初期応力解析を行う。本解析での初期応力は、解析領域内に鉛直応力 p_v 、水平応力 $p_h=Kp_v$ (K :側圧係数) で表される一定の初期応力が発生するものとする。次に、図-1(b)のように step2 でトンネル掘削が行われ、step1 で生じた初期応力が解放される。ここでは、支保工を設置しない、いわゆる“素掘り掘削”する場合と、(応力解放率 0%) で支保工を設置し掘削する場合の両者について解析を行った。

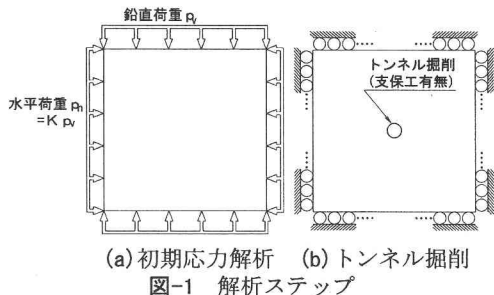


図-2に本解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示す。トンネルは径 $D=10\text{m}$ の円形とし、解析領域をトンネル掘削面から上下左右それぞれ $5D$ 確保した。解析に用いた入力値を表-1に示す。なお、支保工は梁要素としてモデル化している。また、解析結果は、図-2(b)に示す天端節点の鉛直 (Y 方向) 変位および SL 上節点の水平 (X 方向) 変位に着目し整理する。

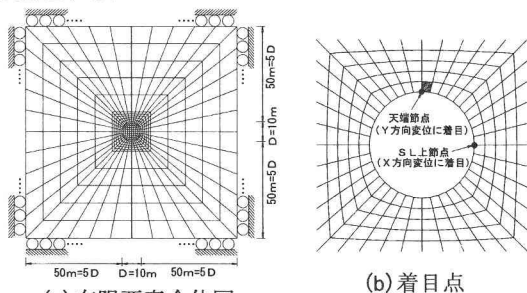


表-1 FEM 解析入力値

項目	物性
地山	変形係数 100(MPa)
	ポアソン比 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
支保工	弾性係数 ¹⁾ 4(GPa)
	断面積 $0.1(\text{m}^2)$
	断面二次モーメント $8.33 \times 10^3(\text{m}^4)$
初期応力 $\{\sigma_x, \sigma_y\}$	$\{1, 1 \times K\}(\text{MPa})$

(2) FEM 解析の結果

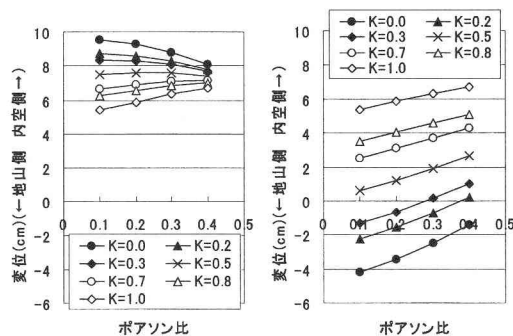
a) 素掘りの場合

支保工がない、素掘り掘削の場合における天端節

点の鉛直 (Y 方向) 変位を図-3(a)に、SL 上節点の水平 (X 方向) 変位を図-3(b)に示す。

図-3(a)によれば、天端変位は、側圧係数が大きいほど小さくなる傾向があることが分かる。また、側圧係数が大きい場合、ポアソン比が大きくなるにつれて、天端沈下が大きくなるが、逆に側圧係数が小さい場合には、ポアソン比が大きくなると、天端沈下が小さくなる傾向があることが分かる。

一方、図-3(b)によれば、SL の水平変位は、ポアソン比が大きく、側圧係数が大きくなるにつれて内空側へ大きく発生する傾向にある。また、側圧係数 $K=0.2, 0.3$ においては、ポアソン比の増大に伴って、SL の水平変位が地山側から内空側へと変わり、変形モードが変化していることが分かる。なお、側圧係数 $K=1.0$ の時、トンネルの変形が等方となることから、天端の鉛直変位と SL 水平変位は一致する。



b) 支保工がある場合

支保工がある場合の天端節点の鉛直 (Y 方向) 変位を図-4(a)に、SL 上節点の水平 (X 方向) 変位を図-4(b)に示す。

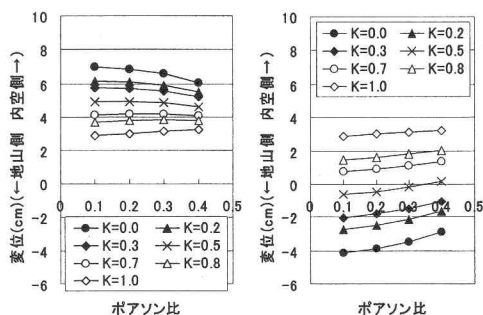
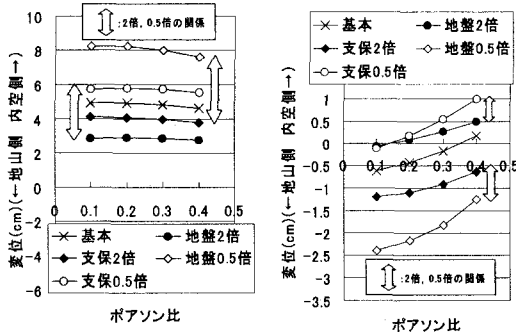


図-4(a)の天端変位は、支保工の変位抑制効果によって素掘りトンネルの場合の図-3(a)より小さくなっ

ていることが分かる。また、発生変位に対するポアソン比の影響も素掘りトンネルの場合より小さくなっていることが分かる。

一方、図-4(b)に示す SL の水平変位については、素掘りトンネルの場合に比べて地山側へ変位する傾向が大きくなっている。

さらに、側圧係数 $K=0.5$ の場合について、これまでの物性値のものを基本ケースとして、支保工の剛性を2倍、0.5倍、地山の変形係数を2倍、0.5倍にした場合の天端鉛直方向変位を図-5(a)に、SL 上の水平方向変位を図-5(b)に示す。



(a) 天端鉛直変位 (b) SL 水平変位
図-5 支保工がある場合の天端のY方向変位

これによると、支保工の剛性や地盤の変形係数を2倍した場合は、天端変位が減少していることが分かる。また、支保工の剛性を0.5倍、地盤の変形係数2倍にした場合、SL 上の水平変位は、内空側に変位する傾向が強くなることが分かる。なお、支保工の剛性を2倍と地盤の変形係数を0.5倍、地盤の変形係数を2倍と支保工の剛性を0.5倍した場合は、それぞれ互いに（図中⇔で表示）変位量のみが2倍、0.5倍の関係となっており変形モードは同一である。すなわち、トンネルの変形モードとしては、ポアソン比や側圧係数だけでなく、地盤と支保工の剛性の比に関係していることが分かる。

3. 骨組み構造解析

(1) 地盤反力係数の算定方法

骨組み構造解析では、地盤を地盤ばねでモデル化するが、その時の地盤ばね値は、一般的に地盤反力係数をもとに算定される。地盤反力係数は、地盤に载荷した圧力を発生変位量で除したものと定義され、ひずみレベルや载荷幅等の影響を受け極めて複雑な物性値であり、設計の実務では変形係数を基にした様々な経験的換算式により算定しているのが現状である。一方、地盤反力係数の定義を考慮すれば FEM 解析を用いて地盤反力係数を解析的に求めることも

できる。本研究では、FEM 解析と骨組み構造解析、両解析手法における荷重の概念の考え方の違いについて考察することを目的としているため、地盤反力係数は両解析手法で物理的に同じ考え方とした方が、解析手法以外の要因を除去できより望ましい。そこで、本研究では、FEM 解析によって地盤反力係数を算定し、骨組み構造解析で用いることとする。

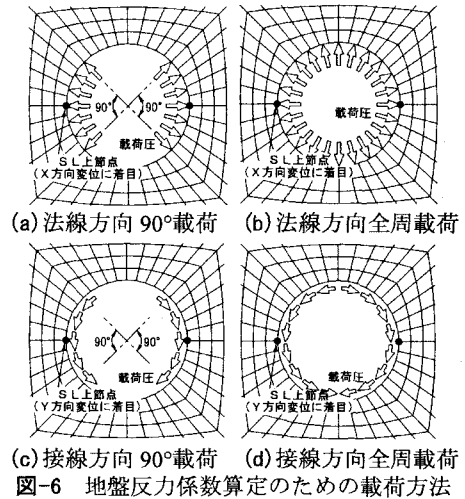


図-6 地盤反力係数算定のための载荷方法

ここでは、FEM 解析によりトンネル壁面に载荷圧を与えた時の発生変位量を求め、地盤反力係数を算定することとする。まず、図-2 に示した有限要素メッシュを用いて素掘り空洞の状態にあるトンネルの壁面に単位荷重（ここでは 1MPa）を载荷する FEM 解析を実施する。载荷は、図-6 に示すように、トンネル壁面に対して法線方向、接線方向および载荷範囲が 90°、全周の場合、合わせて 4 つのパターンで行う。なお、図-6 (a), (b) は法線方向地盤反力係数、図-6 (c), (d) は接線方向地盤反力係数を算出する場合の载荷方法である。そして、载荷圧を、FEM 解析で求まる図-6 に示す着目点の変位で除すことで地盤反力係数を算定することとする。

(2) 地盤反力係数の算定結果

図-7 に地盤反力係数の算定結果を示す。

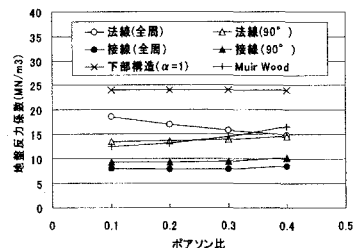


図-7 地盤反力係数の算定結果

図-7によると、地盤反力係数は、載荷範囲の影響を受けるとともに地盤のポアソン比によっても若干異なることが分かる。また、山岳トンネルにおける力学的機能を有する覆工の設計を行う場合等、通常の設計で用いられる道路橋示方書下部構造編²⁾による式(1)により算定した地盤反力係数 $k_v(\text{kN/m}^3)$ (FEM解析での変形係数を平板載荷試験での値と仮定し、 $\alpha=1.0$ とした場合の値とした。一般的には孔内水平載荷試験および一軸圧縮試験での値であるとして $\alpha=4$ で補正する場合が多い³⁾。) および Muir Wood の式(2)⁴⁾より求めた地盤反力係数 $k_v(\text{kN/m}^3)$ も合わせて示す。

$$k_v = \frac{1}{0.3} \alpha E \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-3/4} \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

ただし、 α ：変形係数推定法に応じた係数

E ：地盤の変形係数(kN/m^2)

B_v ：載荷幅(m) (トンネル径 10m とする)

$$k_v = \frac{3E}{(1-\nu)(5-6\nu)R} \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

ただし、 ν ：地盤のポアソン比

E ：地盤の変形係数(kN/m^2)

R ：トンネル半径(m)

これによると、FEM 解析を用いて前節(1)で述べた方法で求めた地盤反力係数は、式(1)より求める地盤反力係数よりかなり小さく、かつ Muir Wood の式(2)より求めた地盤反力とおおよそ一致している。さらに、接線方向地盤反力係数は、一般に用いられている法線方向地盤反力係数の 1/3 より大きいことが分かる。

(3) 骨組み構造解析の概要

ここでは、前節(2)の図-7に示した地盤反力係数を用いた骨組み構造解析を実施する。

解析モデルを図-8に示す。

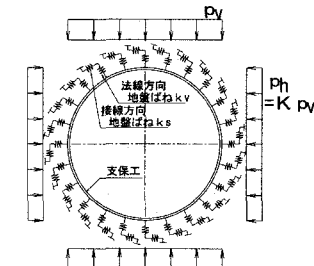


図-8 骨組み構造解析のモデル

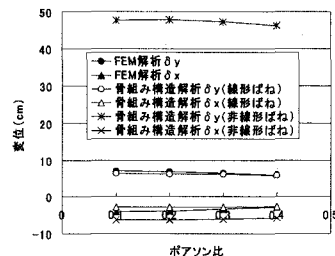
ここで行う骨組み構造解析では、地盤を支保工部材に垂直な法線方向地盤ばねと平行な接線方向地盤ばねにモデル化するが、その地盤ばねを2つの考え

方に拠るものとする。一つは、通常設計で行われるように法線方向地盤ばねをトンネルの内空側に変位した時、無効となる非線形地盤ばねとするものである。もう一方は、通常の骨組み構造解析とは異なり、地盤ばねをトンネルの内空側変位に対しても有効な線形地盤ばねとするものである。

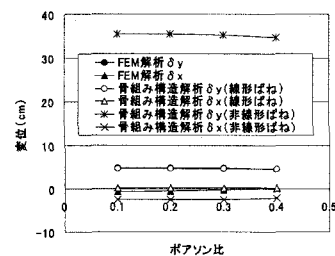
なお、支保工条件は、FEM 解析と同様にし、荷重条件は、鉛直方向から $p_v=1(\text{MPa})$ 、水平方向から $p_h=Kp_v$ (K ：側圧係数)とした。また、地盤反力係数は、側圧係数 $K=1.0$ の場合は図-7の全周載荷によるもの、それ以外の側圧係数では図-7の 90° 範囲載荷によるものとした。

(4) 骨組み構造解析の結果

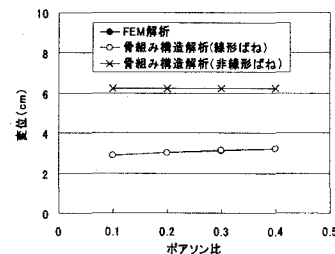
図-9に線形地盤ばねと非線形地盤ばねの2種類の地盤モデルを用いた骨組み構造解析および FEM 解析の結果を合わせて示す。



(a) 側圧係数 $K=0.0$ の場合



(b) 側圧係数 $K=0.5$ の場合



(c) 側圧係数 $K=1.0$ の場合

図-9 解析手法による発生変位の比較

これによれば、地盤モデルを線形地盤ばねとした骨組み構造解析での結果(図中○, △)は、FEM 解

析の結果（図中●，▲）とポアソン比によらず概ね一致していることが分かる。また，変形モードについても，両解析手法はよく一致していた。一方，通常の非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析の結果は，FEM 解析の結果と大きく異なっている。

図-10 は，天端と SL における発生軸力を解析手法ごとに比較したものである（ポアソン比 $\nu=0.3$ のものとした）。これによると，発生軸力は，線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析と FEM 解析で概ね一致していることが分かる。一方，非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析には他の解析手法より大きな軸力が発生している。

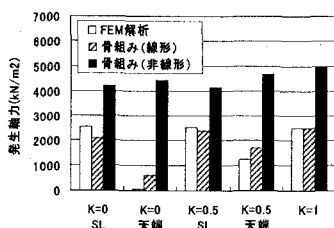


図-10 解析手法による発生軸力の比較

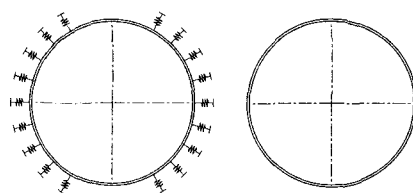
以上のように，骨組み構造解析において地盤反力を FEM 解析から適切に評価するとともに，トンネル内空側変位に対しても有効な線形ばねを用いれば，骨組み構造解析と FEM 解析は変形量や変形モード，発生断面力を概ね等しくすることが出来るものと考えられる。一方，非線形な地盤ばねを用いた骨組み構造解析は，他の両者と全く異なった結果が算出されることが分かる。骨組み構造解析では，実際の NATM 断面のように完全に断面が閉合していない場合，支保工がないトンネル底板の変位の影響が考慮できない。また，地盤ばねは，弾性体と異なり，基本的にある点の変位が近傍に影響を及ぼさない。このような違いがあるものの，以上の結果より線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析と FEM 解析は本質的に同じ解析手法であるとも考えられる。

(5) 非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析に関する考察

ここでは，通常的设计で適用される非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析について考察を行う。

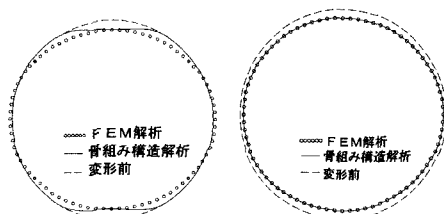
図-11 は，例として側圧係数 $K=0.2$ と 0.8 の場合について，骨組み構造解析における法線方向地盤ばねの設置状況を示したものである。地盤ばねが無い部分は，トンネルが内空側に変位し，地盤ばねが切断され，無効となっていることが意味する。これによれば，側圧係数 $K=0.2$ の場合は，天端付近が，側圧係

数 $K=0.8$ の場合は，全周が，法線方向の地盤ばねが切断され，無効となっていることが分かる。



(a) $K=0.2$ の場合 (b) $K=0.8$ の場合
図-11 法線方向地盤ばね設置状況

図-12 は，FEM 解析（ポアソン比 $\nu=0.3$ のもの）と骨組み構造解析の両解析手法で得られたトンネルの変形モードを例として側圧係数 $K=0.2$ と 0.8 について比較したものである。ただし，両解析での変形図は天端部変位が同じとなるように無次元化し補正している。



(a) $K=0.2$ の場合 (b) $K=0.8$ の場合
図-12 FEM 解析と骨組み構造解析の変形モード

これによれば，側圧係数 $K=0.2$ の骨組み構造解析の場合は，図-11 の地盤ばねが無効となっている天端付近の領域で変形が局所化していることが分かる。一方，全周にわたって地盤ばねが無効となっている側圧係数 $K=0.8$ の場合は，FEM 解析と骨組み構造解析の変形モードに大きな差異が認められない。

以上のことから，通常の非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析では，一部または全周で地盤ばねが無効なることで，荷重が地盤の抵抗を受けず，直接トンネルに作用し，そのことによって FEM 解析より大きな変位が発生していると考えられる。

4. 解析手法によるトンネル作用荷重の差異

ここまで，山岳トンネルの支保工を対象とした FEM 解析，2 つの地盤モデルを用いた骨組み構造解析による簡単な試算を実施し，支保工の変形挙動について考察した。ここでは，これまでの知見により両解析手法における荷重の概念および地盤とトンネル構造物との相互作用の考え方の違いについての考察を行うものとする。

図-13 は、非線形地盤ばねを用いた通常の骨組み構造解析における荷重載荷前後のイメージである。非線形地盤ばねは、トンネル内空側への変位により無効となるため、図-13(b)のような場合にはトンネル上下部においては地盤反力が作用しない。したがって、地盤ばねが無効となった部分では、外荷重は地盤の抵抗を受けずにトンネルに直接作用する。一方、FEM 解析における同様の図を図-14 に示す。FEM 解析では、初期応力の解放力が荷重として与えられ、それに対して図-14(b)のように地盤とトンネル両者で抵抗することとなる。したがって、3.の試算で述べたように、地盤ばね値を適切に評価すれば、FEM 解析は、トンネル内空側変位に対しても有効な線形地盤ばねを用いた図-15 の骨組み構造解析と本質的には違いがない。この場合、トンネルに作用する荷重としては、地盤の抵抗により、当初与えられた外荷重より減少することもあることとなる。

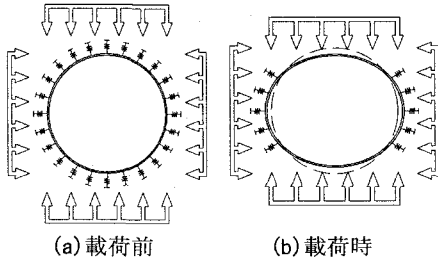


図-13 非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析の荷重状況と地盤抵抗

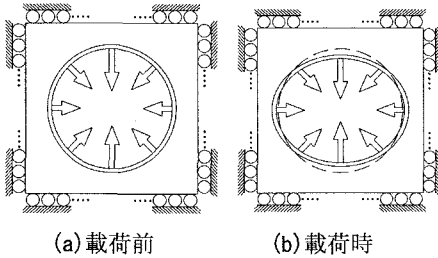


図-14 FEM 解析の荷重状況と地盤抵抗

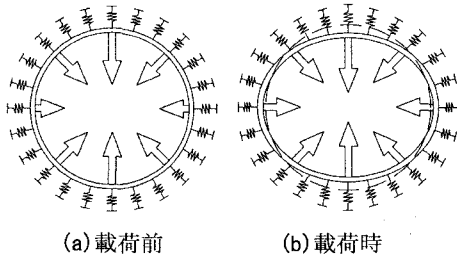


図-15 線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析の荷重状況と地盤抵抗

トンネル作用荷重の概念を説明する特性曲線法がよく用いられる。特性曲線法では、図-16 に示すよ

うな内圧と天端沈下の関係を考える。支保工設置時の天端沈下を $\delta 2$ 、掘削終了時の天端沈下を $\delta 1$ とすると、支保工に発生する天端沈下は $(\delta 1 - \delta 2)$ である。一方、FEM 解析で支保工のない素掘り掘削解析を行えば天端沈下 $\delta 0$ を算出することができ、これより図-16 を書けば支保内圧 p_1 を求めることができる。この支保内圧は、素掘りトンネルにおいて、支保工を設置した場合と同等の変位まで変形を抑制するために必要な内圧であり、擬似的に支保工設置時に支保工に作用している荷重と考えることができる。

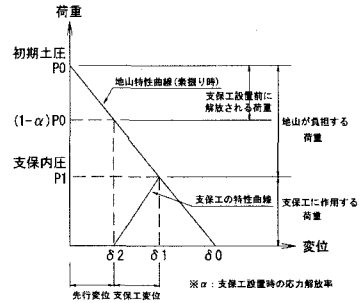


図-16 特性曲線法

トンネルに荷重が作用する場合、トンネルは変形する。支保工に作用する荷重を評価する場合、その変位と土圧の関係をどう評価するかが重要であるとえられる。しかし、一般的な FEM 解析および線形ばねを用いた骨組み構造解析と非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析とは、同じ変位と荷重の関係についてであっても、その意味合いが異なると考えられる。

すなわち、非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析では、内空側へ変位した場合、地盤反力が作用しない。したがって、この場合、支保工に直接作用する荷重としては、当初与えた外荷重であり、かつその荷重は地盤反力を期待しないため変位に依存せず一定である。

一方、FEM 解析や線形ばねを用いた骨組み構造解析では、トンネルが内空側へ変位した場合も、当初与えられた外荷重に対して地盤と支保工の両者が抵抗し、荷重を分担する。そして、支保工に直接作用する荷重としては、特性曲線法で考えた荷重のように、当初与えられた外荷重よりも地盤が分担する分小さい値である。すなわち、FEM 解析では、当初与えられた荷重に対して地盤が変形することにより、その荷重が減少する場合があることとなる。

図-17 は、FEM 解析と線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析、両手法での天端部に作用する鉛直方向荷重に関して、支保工と地盤の分担を示したものである。なお、荷重分担は、次のように求めた。まず、

FEM 解析において支保工が分担する荷重は、図-2 (b)のハッチで示す着目要素における鉛直方向応力とした。一方、地盤が分担する荷重については、初期応力から支保工が分担する荷重を差し引くことで求めた。また、骨組み構造解析における地盤の分担分は、地盤反力（地盤ばねの反力）とした。一方、支保工の分担分は、与えた荷重（1MPa）と地盤反力の差分とすることで算定した。

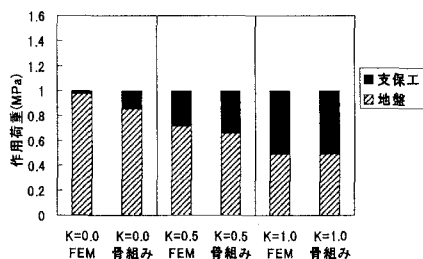


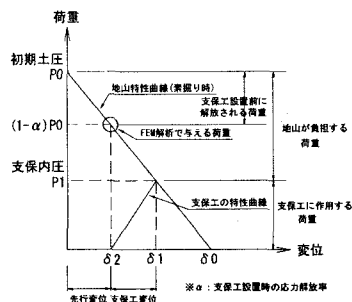
図-17 解析手法による荷重分担の比較

これによると、FEM 解析と線形ばねを用いた骨組み構造解析は、与えた外荷重に対して支保工と地盤が共同して抵抗するとともに、その分担比率は両解析手法で概ね一致していることが分かる。一方、非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析は、天端部の地盤ばねが無効となっているため、地盤の荷重分担はなく与えた外荷重の全てがトンネル天端に作用している。

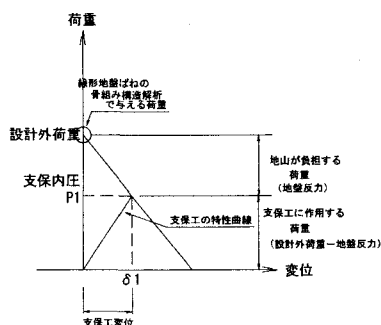
これらの構造解析手法で考える荷重の違いを地山特性曲線上で整理すれば図-18 のようになる。なお、図-18 ではトンネル内空側へ変位した場合をイメージしている。FEM 解析で与える外荷重（解放力）は支保工が変形する前の変位 δ_2 に対応した荷重である。この荷重は、地盤の変形によって最終的には δ_1 に対応した p_1 となりトンネルに作用する（図-18(a)参照）。また線形地盤ばね骨組み構造解析は、切羽到達前（支保工設置前）に地盤が負担している荷重を考慮していないが、本質的に FEM 解析と同様である（図-18(b)参照）。一方、非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析での荷重は、地盤の抵抗なく変位に無関係に支保工に直接作用する。すなわち、与える外荷重は、支保工に変形が起こった後にトンネルに作用している荷重と同じである（図-18(c)参照）。

以上より、次のことが考えられる。すなわち、非線形の地盤ばねを用いた骨組み構造解析は、トンネルを内空側に変位させる荷重と発生変位とが無関係である場合に適していると考えられる。例えば、主働土圧のように変位が増大してもそれ以下とはならない荷重を想定する場合である。一方、FEM 解析お

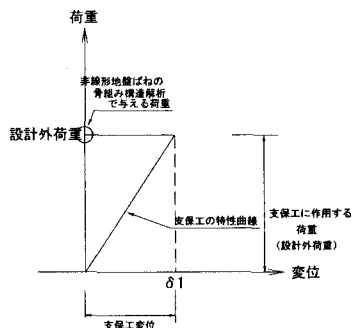
よびそれと同等な線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析は、外荷重としてトンネルの変位と関係する荷重を考える場合に適していると考えられる。



(a) FEM 解析での荷重



(b) 線形地盤ばね骨組み構造解析での荷重



(c) 非線形地盤ばね骨組み構造解析での荷重

図-18 解析手法による土圧の概念

したがって、支保工に作用する荷重と変形の関係に重きをおく場合に FEM 解析を、覆工の設計等荷重としてトンネル変形後に作用すると考えられる最低限の荷重を与えることで構造物の安全性を検証する場合に骨組み構造解析を、それぞれ用いている現状の設計は、むしろ解析手法の特徴をよく捉えているものと言える。しかし、両解析手法において荷重の考え方に大きな違いがあることはあまり意識されておらず、今後、トンネルの数値解析に基づく設計法を確立するため、本論文で述べたように両設計手法の荷重および地盤のモデル化の概念の違いを明確

にしておくことが必要である。なお、内空側への変位に無効な非線形ばねを“引張ばね”と呼ぶこともあるが、変位によって荷重が相対的に減少しないということを意味するものであり、絶対的な引張荷重が発生することを意味するものではないことに注意する必要がある。

5. おわりに

本研究では、山岳トンネルの支保工を対象とした FEM 解析、骨組み構造解析による簡単な試算により、両解析手法における荷重の概念および地盤とトンネル構造物との相互作用の考え方の違いについての考察を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

1. FEM 解析におけるトンネルの変形モードは、ポアソン比や側圧係数で異なる。また、支保工が設置される場合は、地盤と支保工の剛性の比にも関係する。
2. 地盤反力係数を FEM 解析から評価し、線形ばねとして考慮することで、骨組み構造解析と FEM 解析はおおよそ一致させることが出来、両解析手法は本質的に同じであると考えられる。
3. 非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析では、トンネルが内空側に変位することで地盤ばねが無効となり、FEM 解析に比べてトンネルの変位が増大する。
4. FEM 解析での外荷重は支保工が変形する前の変位に対応した荷重であり、この外荷重は、地盤の抵抗によって最終的には減少したのとしてトンネルに作用する。一方、非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析での外荷重は、内空側への変位に依存せず支保工に直接作用する荷重であり、支保工に変形が起こった後にトンネルに作用している荷重と同じである。
5. FEM 解析およびそれと同等な線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析は、支保工に作用する荷重と変形の関係に重きをおく場合に、非線形地盤ばねを用いた骨組み構造解析は、荷重としてトンネル変形後に作用すると考えられる最低限の荷重を与えることで構造物の安全性を検証する場合に、それぞれ適している。

本研究では、実務的な立場から、極めて簡単で限られた設計モデルに基づいた数値解析により、荷重と地盤モデルに関する考え方を整理した。今後はより多様な条件での検討とそれに基づく設計荷重や地盤モデル等の設計モデルの構築が必要である。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験所：トンネル標準設計に関する研究報告書—数値解析と施工実績の分析—，試験所技術資料第 350 号，1986.2
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（下部構造編），2002.3
- 3) 建設省土木研究所トンネル研究室：トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル（案），土木研究所資料第 3232 号，1994.6
- 4) A. M. Muir Wood：The circular tunnel in elastic ground, Geotechnique, 25, No.1, pp.115-127