

# 性能設計および解析によるトンネル設計の試み

トンネル・地下空洞小委員会  
解析WG

## 1. はじめに

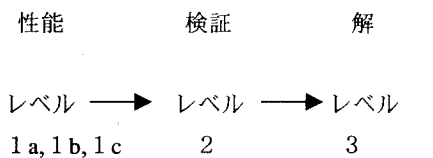
構造物の設計を行う過程を考えると、**図-1**のようにまず構造物に要求される性能が定められ（土荷重 $\circ t$ を支えるなど）、ある合理的な検証法で（弾性論など）その性能を満足させるような解（ $\circ cm$ 厚の覆工）を導くという流れになる。トンネルの技術基準では、地質調査結果から地山分類を行い直接設計図（**図-1**の解）を得るように規定している。こうした解を直接規定する方法（指示規定、仕様規定）に対して例えば「Terzaghiの土荷重に耐えるトンネル」などと性能を規定することを「性能規定」といい、それによる設計を「性能設計」という。技術基準などで性能規定にのみ拘束力を持たせて検証法あるいは解を自由にするにより、設計や施工に自由度を与えることができ、その結果より合理的な構造物が建設できるとされている。ここでは以下にトンネル設計における性能規定化の検討とその一例として解析によるトンネル設計の試みについて報告する。

## 2. 性能規定

### 2.1 設計法の動向

**図-1**の検証の方法に注目して設計法を分類すると**図-2**のようになる。**図-2**で計算法では計算の前提となる外力などの性能を規定し、解には自由度があると言える。しかし、トンネルの経験による手法は**図-1**の解を示すだけで自由度は無い。これに対して近年の世界的な動向は**表-1**に示すように、性能規定の内でも最も合理的と考えられる限界状態設計法を取り入れる方向で進んでいる。ISO2394 (General principles on reliability for structures) やユーロコード (Eurocode, コンクリート, 鋼, 木材, 地盤などの構造物の設計法に関する基準) は未だ案文の段階であるが、いずれも最終調整に入っている。WTOとの関係から日本の技術基準も早晚その影響を受けることが予想され、コンクリートなど日本の構造系技術者は対応に追われている。

こうしたトンネル以外の多くの構造物が性能規定化されその中でもさらに合理的な限界状態設計法を目指していることや、最近の試験・計測・解析技術の進歩などを考えると、現在のトンネル設計法が最適であるのかは再検討すべき時期に来ていると思われる。また解を示すのみで自由度が低いことから、技術進歩の妨げになる可能性が高いことにも注意すべきである。



注)レベル1~3は表-2参照

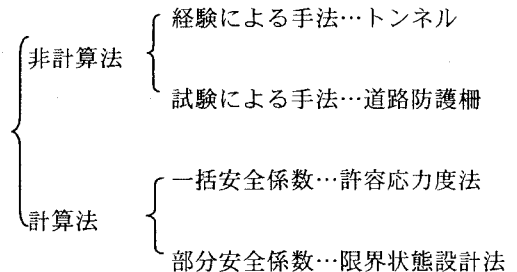


図-1 性能規定システム

図-2 検証法による設計手法の分類

## 2. 2 トンネル設計の性能規定化

性能のレベルを表-2のように区分すると、現在の「道路トンネル技術基準（道路協会）」の各条文はレベル1a, 1b, 1c, を記述しているものがおのおの9, 1, 10%, レベル2について設計関係の記述条文が16%, 施工関係が32%, レベル3が10%, 用語の定義など性能規定に属さない物が22%に分類された。技術的に性能を規定しているレベル1a-1cの部分は20%に過ぎずレベル2を含め設計施工のハウツーに関する規定が多い。

地山分類表は、主に経験に基づいて得られた解であるから、解から逆解析等を行い性能（レベル1c）を明らかにすることが性能規定化に必要となる。性能規定化を進める一步として、表-3のように検証法としての解析法もしくは性能としての計測値などについて規定することが考えられる。

ここでは解析法の規定について検討する。解析手法が通常的设计法として用いられなかった原因として、①解析結果の信頼性が不足している、②解析入力の設定が困難である、③設計コストアップ要因を他のコストダウンでカバーできるか、などの課題が考えられる。そこで解析入力を少なくしコストアップをできるだけ押さえるため、入力条件の少ない弾性FEMモデルを対象とした、弾性FEMによる設計で、解析入力の設定から性能としての解析条件（レベル1c）を考えようとしたのが、次項3.である。

表-1 設計基準の動向

日本の基準	・土木学会示方書（山岳トンネル）	・道路協会（防護柵設置基準）	・道路協会（道路橋示方書） ・土木学会示方書（シールド）	・土木学会コンクリート示方書（耐震）
世界の基準				・ISO2394 (Draft) ・ユーロコード (Draft)
検証法	経験法	試験法	許容応力度法	限界状態設計法
規定法	指示規定		性能規定	

表-2 性能規定システムのレベル

レベル	内 容 (例)
レベル 1a	Overall objectives (安全性など)
レベル 1b	Functional areas (土荷重、風荷重など)
レベル 1c	Required performance (土圧 10 MN/m <sup>2</sup> など)
レベル 2	Verification (試験方法)
レベル 3	Solutions (部材の材料、寸法)

表-3 性能規定化の方法

目標レベル	内容	例
性能 (レベル 1c)	解析条件の規定	地盤の強度、トンネル寸法、トンネル土圧を規定する
性能 (レベル 1c)	計測値の規定	最終内空変位○mm以内と規定する
検証法 (レベル 2)	解析法の規定	FEM、骨組み解析、円弧すべり法のような地盤のせん断破壊を考慮した解析の方法を規定する

## 3. 解析によるトンネル設計の試み

### 3. 1 有限要素法における応力解放率

標準的な地山での現状の支保設計は、地山等級に対応した標準支保パターンの適用による手法が一般的となっている。これらの標準支保パターンは、施工実績の統計分析等により修正されているが、必ずしも支保部材の力学的検討が十分になされているとはいえない。これは、支保部材と地山の相互作用や支保に作用する荷重が明確にされていないことによる。一方、計測結果の逆解析手法により最適設計に向けての取り組みがおこなわれている側面もあり、より合理的な設計手法が求められているといえる。

これらの観点から、支保設計のために有限要素法を利用して、応力解放率を合理的に求めようとする研究が本シンポジウムで発表されている(猪熊 明, 重田佳幸: 応力解放率に着目した山岳トンネル弾性有限法に関する研究<sup>1)</sup>)。

2次元有限要素法では、従来トンネル掘削の3次元な挙動を応力解放率の設定により考慮している。すなわち、切羽通過までの応力解放率をある値に設定し、支保部材を導入した後に残存する掘削相当外力を解放させる解析方法が用いられている。切羽通過までの応力解放率は、計測結果や3次元有限要素法等から一般に30~40%程度の値が用いられてきており、支保部材を打設してからの応力解放率は60~70%となる。ここで、「支保部材を打設してからの応力解放率」を「支保部材応力解放率」と呼ぶこととする。支保部材応力解放率は次式で表される。

$$\text{支保部材応力解放率} = \text{支保部材打設してからの掘削相当外力} / \text{初期土圧} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

同発表論文は、内空変位、ロックボルト軸力、内空変位とロックボルト軸力の乗算により得られるエネルギーに関して、解析値と計測値が一致するような応力解放率を求めたものである。計測値と解析値が一致するような応力解放率を求めることにより、①式より掘削相当外力を特定できる。その掘削相当外力を初期土圧やTerzaghiの土荷重で無次元化し整理したものを図-3~図-5に示す。

これらの成果から、2次元有限要素法を用いる場合の応力解放率および支保設計に関しては以下のように考察される。

① Terzaghiのゆるみ荷重と変形係数から設定する支保部材応力解放率

掘削相当外力とTerzaghiのゆるみ荷重の比と変形係数との関係は、図-3のように整理されている。地質調査結果から求めた地山の変形係数およびTerzaghiの土荷重と図-3から掘削相当外力を求めることができる。土被りと掘削相当外力から①式より解析上の応力解放率が求められる。

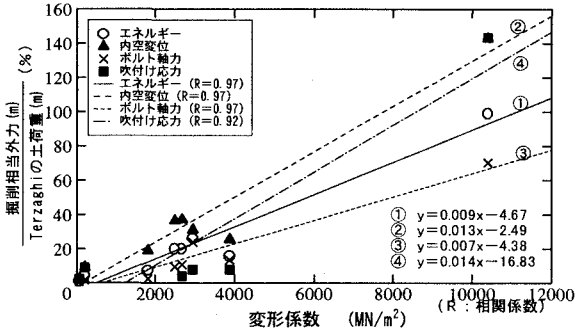


図-3 地山の変形係数と掘削相当外力の関係<sup>1)</sup>

②-1 支保部材応力解放率の簡易設定 その1 (エネルギーの一致する支保部材応力解放率)

図-4、図-5によれば、支保部材応力解放率は、土被り高さや変形係数と相関があまりよくない。しかし、近似直線の傾きが小さいので、

図-5より変形係数4000MN/m<sup>2</sup>以下の地盤を対象に、簡易的にその単純平均値を応力解放率として設定することができる。たとえばエネルギーを求める場合の支保部材応力解放率を34%と設定することができる。

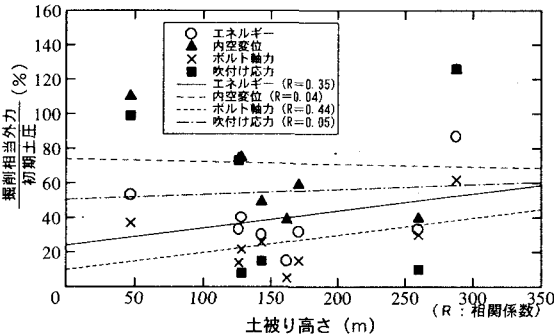


図-4 土被り高さと支保部材応力解放率の関係<sup>1)</sup>

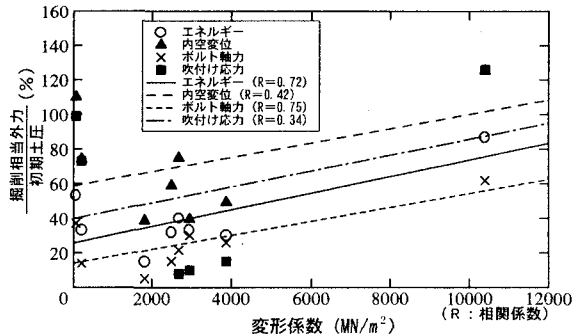


図-5 変形係数と支保部材応力解放率の関係<sup>1)</sup>

②-2 支保部材応力解放率の簡易設定 その2 (内空変位の一致する支保部材応力解放率)

内空変位が一致する支保部材応力解放率(64%)は、従来から2次元有限要素法で用いられている切羽到達以降の応力解放率(60~70%)とほぼ一致した。

②-3 支保部材応力解放率の簡易設定 その3 (ロックボルト軸力が一致する支保部材応力解放率)

ロックボルト軸力が一致する支保部材応力解放率(21%)は、内空変位が一致する支保部材応力解放率(64%)と大きな差異が生じた。この傾向は、実施工の側面から見た場合に定性的には、内空変位と異なり、ロックボルト打設後充填材が硬化し支保機能が発揮されるまでに時間がかかるという点を考慮すると解釈できる。

ロックボルトを当初設計する場合には、支保部材応力解放率を従来の値よりも小さく設定することが望ましいと考えられる。解析結果では、20%程度の応力解放率となるが、今後、データ数を増やし検証することが必要である。

②-4 支保部材応力解放率の簡易設定 その4 (吹付けコンクリート応力が一致する支保部材応力解放率)

吹付けコンクリート応力が一致する応力解放率は、計測値が数MPa以上の場合には、内空変位が一致する応力解放率とほぼ同値となっており、FEMにより吹付けコンクリート応力を予測することができるといえる。なお、吹付けコンクリート応力が1MPa以下の場合には初期材齢時のクリープや乾燥収縮の影響が顕著であり十分な精度での予測は難しいといえる。

以上のように、内空変位・ロックボルト軸力・エネルギーの解析値と計測値が一致する支保部材応力解放率が、それぞれ平均で64%、34%、21%となり3者に明瞭な差異が認められた。このことは、支保部材応力解放率が従来より指摘されているように3次元的な挙動と関係していることを示している。したがって、支保部材応力解放率の設定は、まず、変形係数にもとづいて行い、支保部材によって3次元的挙動を考慮した微調整を行うことが合理的と考えられる。

3. 2 有限要素法を用いた支保設計

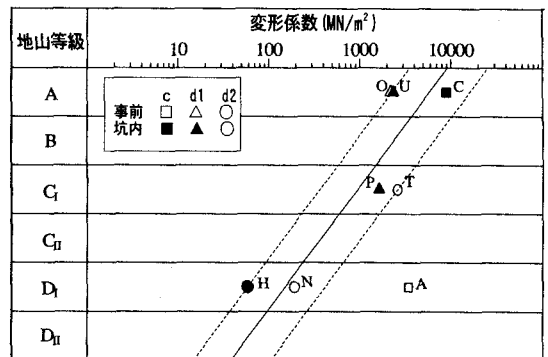
①地山の変形係数

当初設計にあたっては、地山の変形係数を設定する必要がある。解析対象としたトンネルで用いた変形係数は、図-6に示すように簡便式を用いて算出され地山等級との関係が整理されている。今後、変位計測結果の実績から簡便式を用いて岩種毎の地山の変形係数を算出し、さらに各種物性試験結果との関係が求められればより精度の良い地山の変形係数が設定できる。

②2次元有限要素法を用いた支保設計

当初設計時の設計手法として、地山等級(岩種)に応じて変形係数を設定し、応力解放率を図-5などから求め、変位量を予測するとともに、ロックボルト軸力、吹付けコンクリート応力を照査して、支保数量を決定する。なお、支保部材応力解放率の設定は、支保部材によって3次元的挙動を考慮した微調整を行う。

施工時の設計手法として、内空変位量、天端沈下量の初期変位速度等より最終変位量を予測し、変形係数の逆解析により求め、修正設計をおこなう。



注) 地山等級は、道路トンネル技術基準(技術編)<sup>2)</sup>、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-6 地山の変形係数と地山等級の関係<sup>1)</sup>

#### 4. おわりに

合理的な支保部材の設計をめざし、2次元有限要素法による設計手法のたたき台を示した。今後こうした経験を取込んだ簡便な解析による設計と地山分類による設計を並立させ、計測などでチェックして安全を確保しつつより合理的な設計法を開発することが望まれる。

なお、本文の検討・執筆は、猪熊 明（建設省）、長谷川達也（ダイヤコンサルタント）が担当した。

#### 参考文献

- 1)猪熊 明，重田佳幸：応力解放率に着目した山岳トンネル弾性有限法に関する研究，第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2000. 1.