

老朽トンネルの調査とトンネル安定性の評価について

(株) 藤井基礎設計事務所 ○勝部祐治 新宮敦弘

1. はじめに

島根県大田市祖式町～彦摩郡仁摩町にかけての山中に昭和初期につくられたトンネルがある。このトンネルは老朽化がすすみ、覆工が崩れ落ち通行不能になっていた。本論は、このトンネルの適切な修復する目的で実施したトンネルの老朽化の現状と原因を探る調査と、その解析をとりまとめたものである。

その調査項目はトンネル内の変状調査およびトンネルの構造の調査、シュミットハンマー、コンクリート破壊試験、トンネル内からの地盤調査(ボーリング)、岩石試験、ボーリング孔内載荷試験、水質検査、X線分析である。

2. 調査結果

調査地は新生代新第三紀末の火山噴出物(軽石凝灰岩、凝灰角礫岩)の分布地で、固結度は低く、一軸圧縮強度は $6.5 \sim 31.5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。しかし孔内載荷試験による弾性係数は $1749 \sim 8711.3 \text{ kgf/cm}^2$ とやや大きな値を示す。降伏圧が $34.9 \sim 89.6 \text{ kgf/cm}^2$ を示すことより、この地質は変形しにくいが脆い性質をもつことが判明した。X線回折法によると調査地の火山噴出物は石英、長石、クリストバライト、モンモリロナイトよりなっていることが明らかになった。調査ボーリングにより内空断面から $1\text{m} \sim 2\text{m}$ の部分の風化が著しく、弛みによる風化促進があったものと判断される。

次にトンネルの覆工であるが、もともと素掘りのトンネルにコンクリートを巻いた構造であり、覆工の厚い部分 (50cm) や薄い部分 (3cm) があり、特に薄い部分は湧水によりコンクリートの劣化が目立つ。また、トンネル中央付近は覆工の背後に最大 2m の深さの空洞も確認された。空洞のみられる区間長は 90m にもおよび、特にそのうち 50m 区間は空洞も大きくなっている。この覆工の施工時期も一度でなく少なくとも二回に分けて施工されており、中央の 33m 間が新しく覆工も厚いが、両側は古く覆工厚も不均一である。コンクリートの骨材をみると新しい覆工の部分は良質な砕石が使われているが、古い覆工は地山の発生材を使っている。今回はアルカリ骨材反応に係る試験を実施していないので確かではないが、地山に含まれているクリストバライト等はアルカリ骨材反応を起こすことで知られている鉱物である。

以上の調査結果よりトンネルの老朽化と損傷はその覆工コンクリートの品質に起因していると判断した。

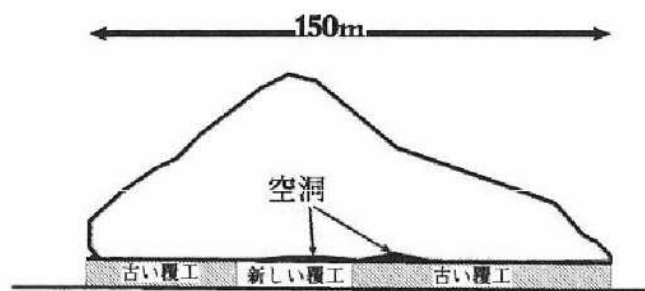
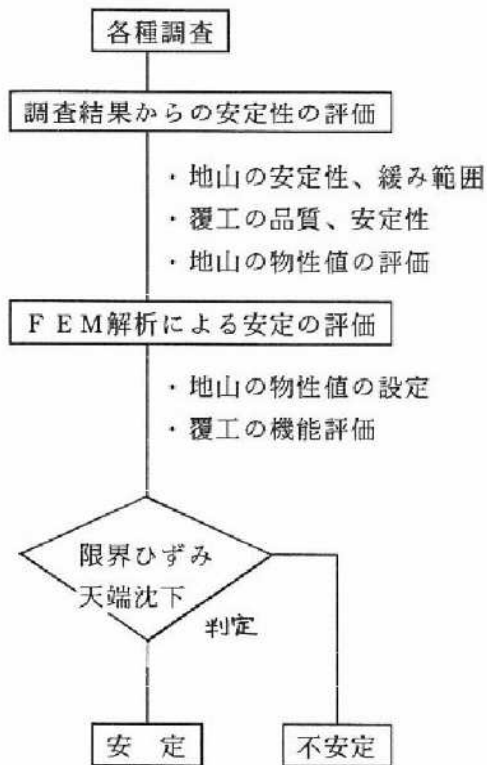


図-1. トンネル縦断模式図

3. トンネル安定性の評価

トンネル安定性の評価は、図-2に示すフローチャートに従って行った。



① 調査結果からの安定性

地山は固結度の低い岩盤であり、日本道路公団の岩盤分類では岩種dに区分される。地山は掘削面から1~2mの範囲は緩んでいる状態である。しかも、部分的には最大2mの奥行きで空洞が存在する。

固結度が低く、表層は緩んでいる状態であるが、亀裂等は少なく一様な状態であり、硬質粘土のように評価でき、粘着性が高く、自立性の高い地山であると評価した。

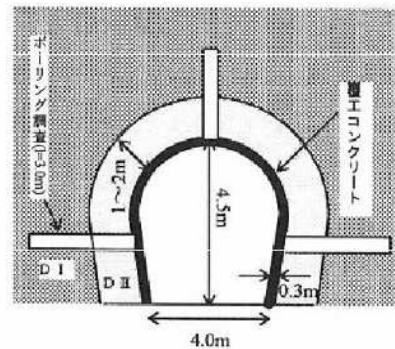


図-2 安定性評価フローチャート

図-3 地山の安定性（調査結果）

② 地山の物性値（調査結果）

孔内水平載荷試験とボーリングコア軸圧縮試験の結果を表-1にまとめた。

表-1 地山物性値調査結果

変形係数 E (kg/cm ²)	一軸圧縮強度 q _u (kg/cm ²)	E ₅₀ (kg/cm ²)	単位体積重量 γ (t/m ³)
1,500~8,700	10.0~30.0	800~5,800	2.1~2.2

③ 物性値の設定

地山物性値を以下のように設定する。

表-2 地山物性値の設定

地山区分	γ (t/m ³)	E (kg/cm ²)	ν	備 考
D II	2.0	2,800	0.40	局部的に緩みのある部分について設定
	2.0	1,500	0.40	
D I	2.1	7,500	0.35	

γ は試験結果と道路公団の一般値を総合的に評価した。

E はD IIにおいては、平均値と最低値を設定し、計算時のトライアルによって最終的な設定値を決定する。ν は道路公団の一般値を流用した。

④ FEMによる安定評価方法

トンネルの現況の安定性を評価するために有限要素法 (FEM) を用いる。安定の評価については、NATMの現場管理を参考にして行なう。その考え方は「限界ひずみ」と言われるものであり、その内容は以下のとおりである。

<限界ひずみによる評価>

これはNATMトンネルで検討されているものであり、トンネルの内空変位、天端沈下、地中変位などの変位計測結果から地山ひずみを逆算し、ひずみの大きさによってトンネルの安全性を定量的に評価する方法である。

「限界ひずみ」は図-4のように定義される。

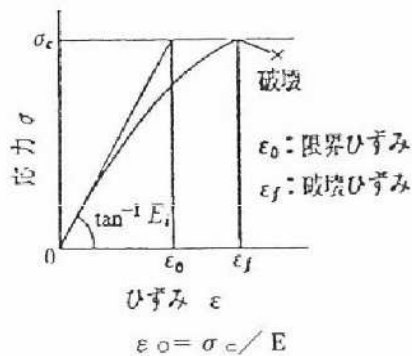


図-4 限界ひずみの定義

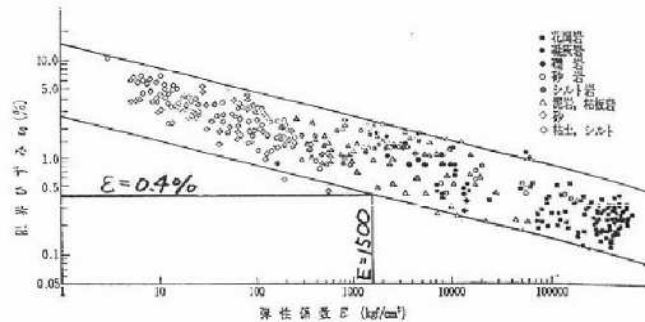


図-5 弾性係数と限界ひずみの関係

破壊ひずみは弾性体及び弾塑性体が破壊するときのひずみである。これに対し「限界ひずみ」は圧縮強度を σ_c を弾性係数で除したものであり、破壊ひずみよりやや小さい値をとる。「限界ひずみ」を越えるひずみが生じると破壊に及ぶ可能性が大となることから、「限界ひずみ」を安全性に対する指標とすることができるものと考えられる。

多数のデータから、弾性係数Eと限界ひずみ ε_0 の関係は図-5のようになる。この関係は、かなり幅を持つものの評価としては下限値を用いることができる。

⑤ FEM解析による安定の評価

地山物性値は、緩み範囲 (DII) の変形係数を $E=1,500 \text{ kg/cm}^2$ としており、限界ひずみは、図-5に示すように $\varepsilon=0.4\%$ と設定する。

トンネル延長150mの内、4断面を選んで検討した。結果を表-3、図-6に示した。

表-3 FEM解析結果

		変形量 (cm)	ひずみ (%)	判定
天 端 沈 下	NO.1	0.54	0.23	○
	NO.6	1.28	0.54	×
	NO.9	0.78	0.33	○
	NO.13	0.40	0.17	○
地 中 変 位	NO.1	0.16	0.16	○
	NO.6	0.39	0.34	○
	NO.9	0.29	0.22	○
	NO.13	0.13	0.12	○

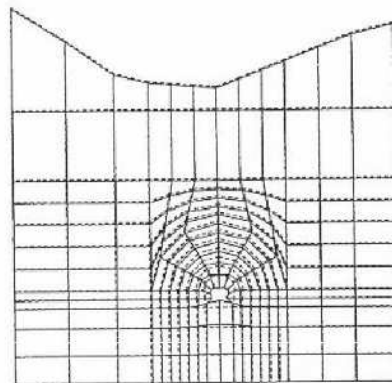


図-6 変形図 (測点NO.6)

安定の評価においては、覆工コンクリートを考慮した解析や、緩み土塊が覆工に盛土荷重のように加わるとした解析も実施した。これらの解析結果から、老朽トンネルの安定を以下のように評価した。

1. 地中変位から求めたひずみは、限界ひずみを越えるものではなく、安定と評価される。
評価対象としては地中変位を重視すべきと考える。
2. 天端沈下から求めたひずみは、測点NO.6で限界ひずみを越える。しかし、値としては $\varepsilon = 0.54 > 0.4$ で大きく限界ひずみを越えるものではない。また、覆工を考慮した計算ではひずみが抑制されて限界ひずみを満足する。他の断面では限界ひずみを満足する。
3. 基本的に地山は自立性があり、現状で地山が崩壊に達する変形を生じる危険性は少ないものと評価される。
4. 覆工コンクリートの応力度のチェックからは、部分的に不安定と評価される。これは、コンクリートの品質劣化と覆工厚が薄いことに起因する。
5. 将来的に最も安全側を考慮して、緩み範囲の荷重が盛土として覆工に加わると仮定すると、部分的に不安定と評価される。従って、これらの区間ではなんらかの対策の必要がある。

4. トンネルの復旧計画

トンネルの安定性評価に基づき、トンネル復旧計画を以下のように実施した。

現況の覆工コンクリートをそのままにする場合、覆工が不安定と評価された区間は、ロックボルトによる補強を図る。トンネル全線にわたって安定が確保された時点で、内側に新しい覆工コンクリートを打設し復旧計画とする。また、空洞は気泡モルタルによって充填する。

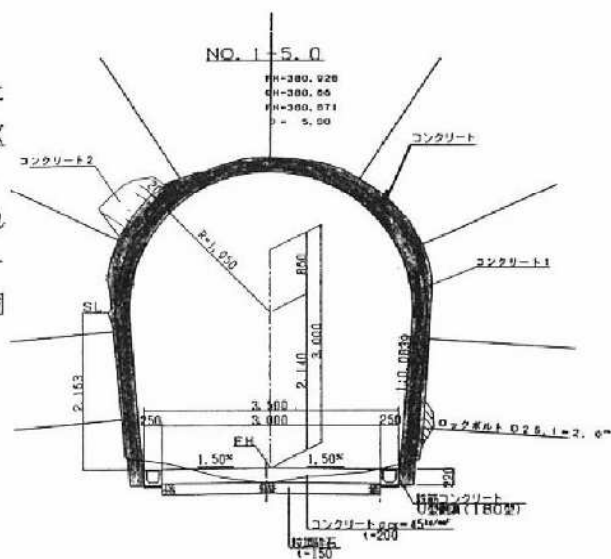


図-7 トンネル復旧断面図

5. おわりに

老朽トンネルの調査と安定評価を行った事例を紹介した。この調査では、老朽化の原因が地山にあるのか？覆工にあるのか？湧水にあるのか？という疑問を一つずつ解決していき、最終的に「地山は安定しているが、覆工の品質に問題があった。」という結論が得られた。調査に入る前に、「地山は安定しているからトンネル断面がつぶれていないのだ。」という感想を持っていたが、解析によってそれが裏付けられたと思う。このような問題の場合、調査と解析がうまく噛み合うことが大切だと考える。