

(39) 既設トンネル老朽度の調査手法の開発

パシフィックコンサルタンツ(株)	正会員	谷口親平
RAAX(株)		亀和田俊一
パシフィックコンサルタンツ(株)	正会員	米田裕樹
RAAX(株)		国分英彦

Development Of Inspection Method For Diagnosing Aging Tunnels

Shinpei TANIGUCHI, Pacific Consultants Co., Ltd.
Shunichi KANEWADA, RAAX Co., Ltd.
Hiroki YONEDA, Pacific Consultants Co., Ltd.
Hidehiko KOKUBU, RAAX Co., Ltd.

Abstract

In this paper, we discuss the outline of BIPS (Borehole Image Processing System), developed as an inspection method for diagnosing aging tunnels, and its application in design and construction.

It is especially significant to specify the extent of the relaxed zone when deciding the necessity of reinforcement measures, the necessary construction method and the zone to be reinforced.

The abstract is as follows.

- 1) In order to diagnose the relaxed zone, open crack distribution based on the "BIPS" image is described as crack opening accumulation curve.
- 2) In this curve, section where crack opening shows linear increase (natural bedrock) and section where sharp increase in crack opening occurs (relaxed zone) can be distinguished.
- 3) Both velocity logging and borehole dilation tests confirmed the relaxed zone specified by this method.
- 4) Prevention of the crack spreading by means of rock bolts were chosen as the reinforcement measure. The length and the extent of the zone to be bolted can be specified in the initial inspection stage, proving the efficiency of the system in design and construction.

1. はじめに

近年道路改良工事として、既設トンネルの補強工事あるいはトンネル拡大工事の需要が多くなっている。これらの工事に先だち、既設トンネル背面の変状箇所の状態、規模、およびその原因についての調査と対応策が重要となる。最近、ボーリング孔を利用して岩盤状態を調査する研究・開発が注目されつつある^{1)~3)}が本報告は、老朽化したトンネルを診断する調査手法として開発したBIPS(孔壁展開画像システム)の概要と設計・施工への応用について述べるものである。特に既設トンネル背面のゆる

み領域を把握することが補強対策の必要性の有無を判断するために有効であり、かつその施工方法、施工範囲を知る上で重要となる。ここではそのゆるみ領域の判定をするためにBIPSとその他の検証手法を組み合わせることで良好な結果を得た調査例を紹介すると共にその補強対策の応用について併せて報告する。

2. 調査トンネルの概要

調査トンネルは、1900年（明治35年）に築造された幅員 $W=6.0$ m、延長 $L=353$ mの道路トンネルであり、築後88年を経てかなりの老朽化がみられる。トンネルの地質は、中世代ジュラ紀に属する粘板岩・砂岩からなり、多くの石英脈が貫入している。又、小破砕帯や節理の発達がみられ、クラッキーな岩盤をなしている。

本トンネルは、3～4層積みのレンガ巻立を行っており、以下の問題点を有している。

- (1) レンガ巻立に多数の剥離箇所があり、今後レンガ落下による交通事故の恐れがある。
- (2) この剥離原因が巻立本体劣化によるものであれば、トンネル本体の安全度に重大な懸念がある。

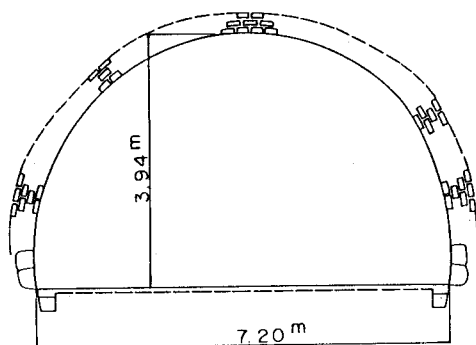


図-1 調査トンネル断面図

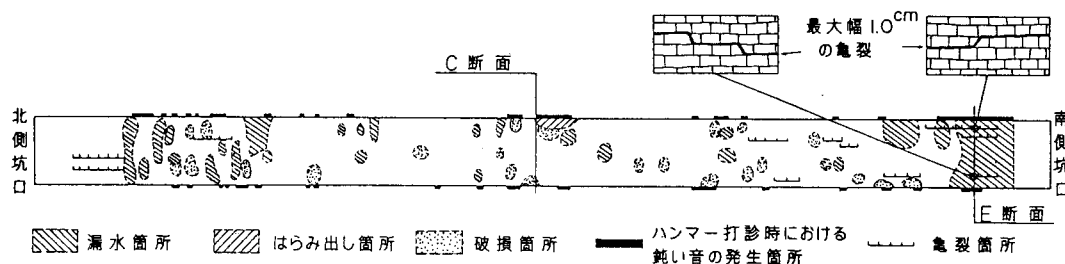


図-2 調査トンネル破損状況図

3. BIPSシステムの概要

BIPS (Borehole Image Processing System) は以下の特徴を有している。

- (1) ボーリング孔の孔壁を連続撮影し、孔壁の展開画像と全周生画像を同時に見ることができる。
- (2) ゾンデの降下速度を任意に調節し、一点に停止させて長時間の観察（地下水の湧水箇所の特定等）を行うことができる。
- (3) パソコンのCRT上で展開画像を任意縮尺で見ることができ、地質解析（地層面、不連続面の走向傾斜や開口中の測定等）ができる。
- (4) 孔壁画像の三次元表示ができる。

本装置のシステム構成は図-3に示す通りである。

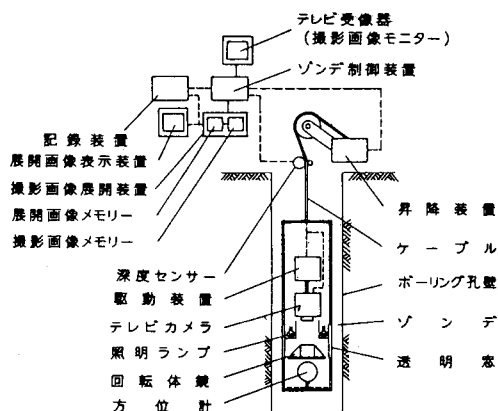


図-3 BIPSのシステム構成

4. 調査の考え方

トンネルが老朽化する原因は、外力の作用、および地下水の影響という一次的な原因によるものと、建設材料（巻立）の劣化といういわば二次的な原因によるものがあるが、この外力の作用も建設材料の劣化に影響し、老朽化はこれら2つの原因が競合したものと考えられる。

ただ、一次的な原因が定量的に把握できれば、補強対策の必要性の判断あるいはその施工範囲、施工方法を選定でき得る点に着目して、本トンネルにおいて既設トンネルの背面調査（ゆるみ領域の推定）を実施した。本調査ではトンネル内から鉛直上向きに $L=5.0$ mのボーリングを行い、孔内においてBIPシステムによる孔壁画像の観察を行った。さらに孔内載荷試験、および速度検層結果との対比からゆるみ領域の検証を行った。

その他、劣化調査として、トンネル変状調査（クラック、漏水調査）、巻厚調査も併せて実施した。

5. 調査結果

今回まとめた調査結果は以下の通りである。

- (1) トンネル変状調査（クラック、漏水調査）
- (2) トンネル巻厚調査
- (3) トンネル背面調査（BIPシステムによる孔内展開画像処理と速度検層、孔内載荷試験）

以上より次の事実が判明した。

- a) 両坑口の漏水の多い区間の背面に地下水がまわりレンガが軟質化している。
- b) 特にE断面右肩（4段積）ではレンガ、および目地に開口クラックが3段目の奥行にまでおよんでおり、レンガ巻立に応力集中が生じた場合、現在のままでは長期的なトンネルの安全性に懸念がある。
- c) 中央部（C断面 図-4）、および南側坑口付近（E断面 図-5）での天端はゆるみ領域が2.2～2.7 m程度と大きい。
- d) C断面側壁部は一部はらみ出しを起こしており、その背面の岩壁は変質劣化が激しく、地下水流動がみられる。

以上のことは、レンガ巻立の劣化の進行を早めるところを示しており、地山に対する補強対策が必要となると判断される。

以下にC、およびE断面についてのゆるみ領域推定の手法について述べる。

図-6、7に孔壁展開図と、これから読み取られた亀裂頻度グラフと各亀裂の位置と開口巾及び開口量に累積曲線図を併せて示す。

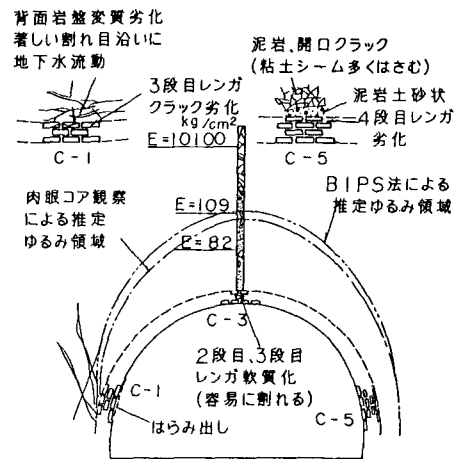


図-4 中央部断面図（C断面）

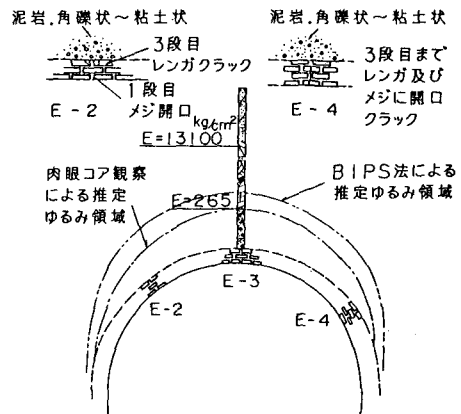


図-5 南側坑口付近断面図（E断面）

E断面ではライニング背面から2.1 m付近に10mm以上の開口亀裂が発達しており、これを境に深部では亀裂頻度、および開口巾が小さくなっていることが分かる。又、ライニング直上の部分ではほとんど礫状を呈しており、崩落した状態と考えられる。このゆるみ部分とそれ以外の岩盤の境界は、亀裂頻度グラフや開口の大きさによっても明らかであるが、累積ゆるみ曲線のグラフを描けば、変曲点の位置であることが読みとれる。各孔ともに岩盤内部からゆるみ量が増加する部分とライニング背面で急激に立上る部分が認められ、前者の開口量のリニアな増加部分が自然地山状態を示すものとすれば、後者は明らかにトンネル掘削に伴う岩盤のゆるみ部分であると考えられる。この変曲点を境に内空側をZONE 1、岩盤側をZONE 2とすれば、ZONE 1の深度はライニング背面から2.2 ~ 2.7 m程度を示しており、これが当トンネル天端部分の平均的ゆるみ量であると考えられる。

6. その他の調査手法との整合性

BIPシステムによって推定したゆるみ領域が妥当であるかを一般的に広く使われている孔内原位置試験で検証した。孔内原位置試験としては、(1) 標準貫入試験 (2) 孔内水平載荷試験 (3) 物理検層 (速度検層・電気検層・温度検層等) 等がある。この中で岩盤の力学特性を表わす(2) 孔内水平載荷試験、(3) 速度検層がゆるみ領域と新鮮岩部との違いを示す適切な方法であると考えられる。

図-6、7と同一孔における試験結果をZONE I / II区分により取りまとめて表-1に示す。

この表から、図-6、7におけるZONE I / II区分の力学特性の差は明らかである。変形係数で見ると各孔ともZONE IIにおいては $1.0 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対し、ZONE Iでは $2.7 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ 以下の小さい変形係数しか示していない。一方、弾性波速度においてもZONE IIにおいて 3.0 km/s を示すのに対し、ZONE Iでは 2.0 km/s 以下であり、ZONE Iのゆるみ状態が明らかである。

以上よりBIPSで推定したゆるみ領域がその他の調査手法との組合せで妥当であったと思われる。

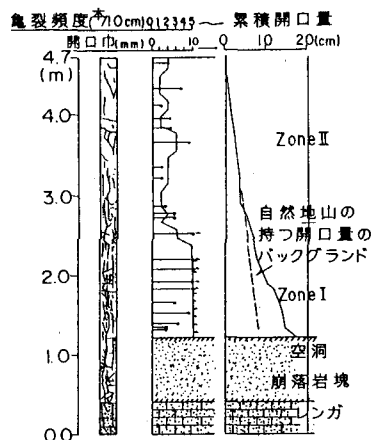


図-6 C断面でのゆるみ領域の推定

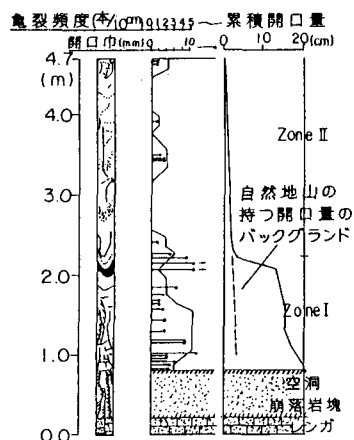


図-7 E断面でのゆるみ領域の推定

7. 補強対策への応用

本調査結果より老朽化の原因がトンネル背面のゆるみ領域の進行に伴う岩盤劣化と地下水流動によるレンガ、および目地の劣化に起因しており、これら老朽化の著しい区間がトンネル中央部及び両坑口付近に分布していることが判明した。これらの区間で、ゆるみ領域に対する補強を行えばレンガ巻立劣化の進行も抑制できると判断した。

補強対策としては、エアーモルタルによる背面注入とロックボルトによる補強を選定した。これは、今回の調査で巻立背面に30～60cmの空洞部が認められ、このゆるみ領域に開口亀裂が集中していると判明したため、エアーモルタルによる背面注入を行うことによって、地山と巻立とを一体化させ、アーチアクション効果を形成させるものとした。

BIPSによって空洞部、およびゆるみ領域の規模が把握できたため、エアーモルタルの注入量と範囲を判定することができた。又、ロックボルトは新鮮岩部に定着させることにより、ゆるみ領域の拡大を防止することを意図した。

他に補強対策としては、薬液注入工法による地山改良があるが、この方法ではレンガ巻立への均等圧力が得にくく覆工の開口クラック拡大の懸念がある。又、トンネル内側からの覆工（吹付）も考えられるが、ゆるみ領域拡大防止という点では期待が薄い。

ロックボルトの長さについては、新鮮岩部に1m～1.5m程度定着させ4mとし、範囲については、両肩部の巻立背面で亀裂が集中している範囲（E-2からE-4）までとした。

孔番	BIPS解析による 岩盤区分	深度(m)	孔内水平 載荷試験 E値(kg/cm ²)	速度検層 Pv(km/s)
C-B1	Zone 1 (ゆるみ域)	1.20～2.60	81～89	1.0～1.9
	Zone 2	2.60～4.70	10100	3.02
E-B2	Zone 1 (ゆるみ域)	0.80～2.20	266	—
	Zone 2	2.20～4.70	13100	—

表-1 トンネル周辺の岩盤力学特性

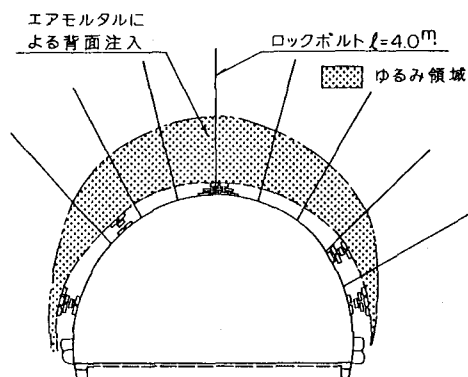


図-8 ロックボルトによる補強対策

8. 今後の検討課題

孔壁画像解析による岩盤評価とこれを速度検層、および孔内載荷試験で検証する方法によってトンネル背面のゆるみ領域を特定する手法が有効であることを述べたが、今後、既設トンネルの近接施工時にBIPSを用い、事前と事後の地山状況の変化を把握することによって補強対策への応用も考えてゆきたい。機会があれば、その調査結果も発表したいと考えている。

参考文献

- 1) 久世他“安平ダムにおける亀裂性岩盤の透水性について” 応用地学会研究発表会, 1988, pp22～25
- 2) 遠藤他“岩盤調査におけるBIPSシステムの適用例” 応用地学会研究発表会, 1988, pp18～21
- 3) 亀和田編“ボアホール壁面鏡画像からのコア画像の作成” 日本鉱業会新技術シンポジウム, 1988