

既設トンネル周辺岩盤の調査手法と設計への応用

INVESTIGATION METHOD FOR ROCK MASS AROUND PRE-EXISTING TUNNELS AND ITS APPLICATION IN DESIGN

谷口親平*・亀和田俊一**・米田裕樹***

By Sinpei TANIGUCHI, Shunichi KAMEWADA and Hiroki YONEDA

In this paper, the outline of the BIP system, suitable investigation method for rock mass around pre-existing tunnels and its application in design are discussed.

The BIP system is effective in evaluating 1) the scale of voids, 2) loosening zones behind tunnels and 3) direction of dominating cracks and altered zones.

This method will prove efficient in design and construction especially when 2) and 3) are specified. This will enable the suggestion of the area to be pre-bolted and the length and direction of bolts necessary to avoid further spread of loosening zones during the investigation stage.

Keywords: investigation method for rock mass, bore-hole TV, image processing technology

1. ま え が き

近年、交通量の増加に伴い既設道路トンネルの改築工事の需要が多くなっている。

改築工事に先だち、既設トンネルの変状箇所の状態、規模およびその原因についての調査とその対応策が重要となる。

最近、ボーリング孔を利用して、岩盤状況を調査する研究・開発が注目されつつある^{1)~4)}が、著者らは事前調査のボーリング孔の孔壁を連続撮影し、孔壁展開画像を処理する手法 (BIPS; Borehole Image Processing System, 孔壁展開画像システム) を開発⁵⁾し、既設トンネル背面の調査を行った。

その結果、BIPS は以下に示す事項に有効であることが判明した。

既設トンネル背面の、①空洞の規模、②ゆるみ領域の推定、③亀裂の卓越する方向と変状部分の推定。

特に、②、③が判断できれば、ゆるみ領域を拡大させないための補強対策およびその施工範囲を調査の段階で示唆することができる。

本論文では、BIPS の概要と調査例およびその補強対策例について報告する。

2. BIPS の概要

BIPS (Borehole Image Processing System) はボーリング孔の孔壁を連続撮影し、地質解析を行うことが可能な装置である。

これまで一般に使われてきたボアホールテレビは視野が狭いため、孔壁の連続性の判断および亀裂の方向の判断を行うためには、写真の貼り合せ合成に多大な時間と労力を要したが、BIPS はこれらの欠点を補っている。

装置の特徴は以下のとおりである。

- ① 現地において孔壁の展開画像と全周生画像を同時にリアルタイムでみることができる。
- ② ゾンデの降下速度を任意に調節し (0~50 m/h) 一点に停止させて長時間の観察 (地下水の湧出など) 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みることができ、地質解析 (地層面、不連続面の走向傾斜や開口幅の測定など) 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-1 のとおりである。

なお、本装置はゾンデ部分をロッドに固定し、孔内に送り出すことで鉛直以外に任意の方向に推進された孔に

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 西日本事業本部第一技術部 (〒541 大阪市中央区南本町 2-5-9)

** (株) Raax 代表取締役 (〒101 札幌市北区北 14 条西 2 丁目)

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 西日本事業本部第一技術部 (〒541 大阪市中央区南本町 2-5-9)

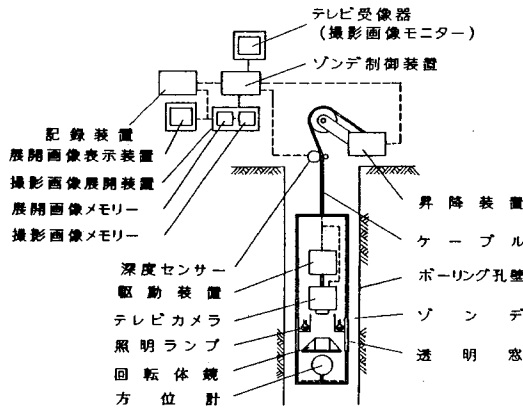


図-1 BIPSのシステム構成

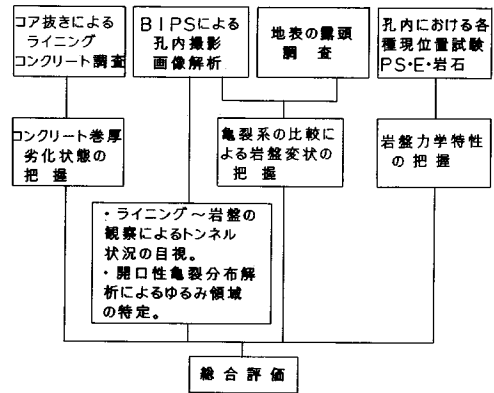


図-2 既設トンネル拡大の現況調査フロー

適用が可能である。

したがって、既設トンネル内での背面の岩盤に向かって掘進されたボーリング孔を使って、さまざまな情報を定方向に得ることが可能である。

3. 既設トンネル調査の考え方

既設トンネルの調査項目は以下のとおりである。

- ① 既設トンネル覆工巻厚
- ② 既設トンネル背面の空洞の規模
- ③ 既設トンネル背面ゆるみ領域の推定
- ④ 亀裂の卓越する方向と変状部分の推定

おのおのの目的を以下に述べる。

① 既設トンネル覆工巻厚

既設トンネルの覆工に薄い箇所があれば、拡大時のゆるみが既設トンネル覆工に載荷された場合、崩壊する危険性もありこの巻厚測定は施工法の検討のうえで重要な要素となる。

② 既設トンネル背面の空洞の規模

既設トンネルと地山との空隙は拡大時にさらにゆるみを拡大させる要因ともなり、その規模を知る必要があり、場合によっては地山と空洞部の注入計画に反映できる。

③ 既設トンネル背面のゆるみ領域の推定

拡大施工の最も重要な点は既設トンネルのゆるみ領域をそれ以上に拡大させないことである。

既設トンネルのゆるみ領域を推定できれば、その領域外の新鮮岩にロックボルトを定着させ、拡大時のゆるみを最少限に押えることができる。

④ 亀裂の卓越する方向と変状部分の推定

亀裂の卓越する方向および変状が推定できれば、補強対策の施工範囲およびその方向を判定することができる。

現況交通止が可能の場合、これらの補強対策が既設トンネルから事前に行うことができる点は、拡大施工の有

利な点であろう。

図-2に調査フローを示す。

4. 調査例

(1) 空洞の規模

写真-1はHトンネルにおける観察例で、No.2孔においてはライニングコンクリート背面に約35cmの空洞部分が存在し、また、岩盤の一部がブロック状に完全に浮石状となっているのが観察される。

一方、Oトンネルにおいては、写真-2に示すように1.1mの空洞部が存在することが判明した。

(2) ゆるみ領域の推定

図-3(b)は、Oトンネルにおけるトンネル背面の岩盤に発達する開口亀裂を、トンネル背面からの距離と開口の大きさで整理して示したものである。

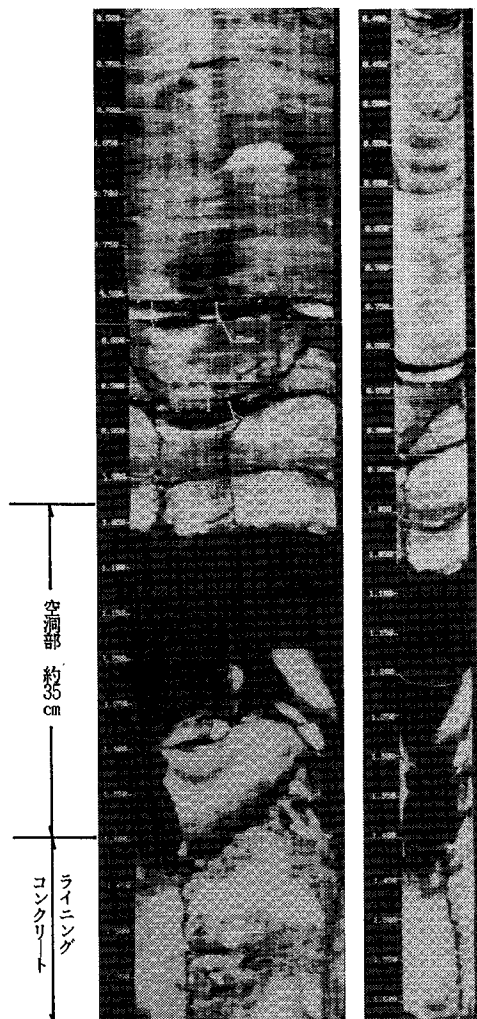
これによれば開口性1~2mm程度の亀裂がほぼ均等な密度で分布しているのに対し、8~10mm程度の大きい開口性を示す亀裂が内空近傍に集中して分布しており、これらがトンネル掘削とその後の経過に伴って発生したものであることを示唆している。

図-3(a)は(b)において任意の点を基準点とし、ここからトンネル内空に至る区間の開口亀裂の開口量を累積して示したものである。

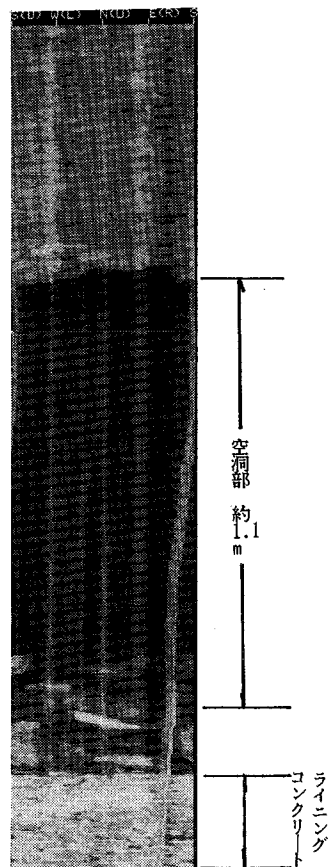
本図において割れ目の開口度は展開画像上で読み取った最大部分とし、割れ目の方向性に無関係に開口量を累積している。

したがって内空側で示される累積ゆるみ量は直接孔壁の変位量を示すのではなく、岩盤内に存在するゆるみ量の大小を示す指標としてとらえられる。

ここに示される累積ゆるみ量曲線は、基準点から内空側に向けて、ゆるみ量が増加する傾向を示しており、均等な密度で分布する開口亀裂によってゆるい傾きのリニアな直線で示される自然地山のもつバックグラウンドの



写真—1 展開画像処理による空洞規模
(Hトンネル)



写真—2 展開画像処理による空洞規模
(Oトンネル)

部分と、内空側近傍でトンネル掘削によって発生したと考えられる開口亀裂によって示されるゆるみ量が急に増加する部分が認められる。

いま (a) において自然地山のバックグラウンドの量を①とすれば、本地点における岩盤ゆるみの発生区間は、岩盤の掘削面から約 1.6 m の範囲であり、この区間の累積ゆるみ量は 41 mm となる。

このゆるみ量を壁面に直交する方向への押し出し量と考えると、1.5% のひずみ量を示すことになる。

これは地山変形係数とひずみの関係から切羽の安定を示した図—4⁹⁾からも切羽が不安定領域に位置 ($E = 1300 \text{ kg/cm}^2$ とひずみ = 1.5% の交点) することを示している。

(3) 亀裂の方向と変状部分

Oトンネル地点の地質は三波川帯に属する結晶片岩からなり、図—5に BIPS 測定結果を総合して亀裂系のシュミットダイヤグラムを示したものである。

露頭においては、亀裂の走向傾斜はあらゆる方向に散在しており、明瞭な傾向を示していない。

これに対して、No.1 孔では $N40^\circ \sim 60^\circ E$ の走向を示す片理群とこれに平行な走向を示し、 $10^\circ \sim 20^\circ SE$ に傾斜する亀裂の発達が顕著である。

これは、卓越する片理面の傾斜と直交する $70^\circ \sim 80^\circ NW$ の方向が変状しやすく、トンネル横断面に対して天端より右肩部にかけての ($\theta \approx 30^\circ$) 部分を示すものと考えられる。

5. BIPS による調査結果と設計への応用

Oトンネルにおいては、BIPS によって表—1に示す事実が判明した。

補強対策としては、事前にロックボルトによる補強とエアームタルによる背面注入を行いゆるみ領域の拡大

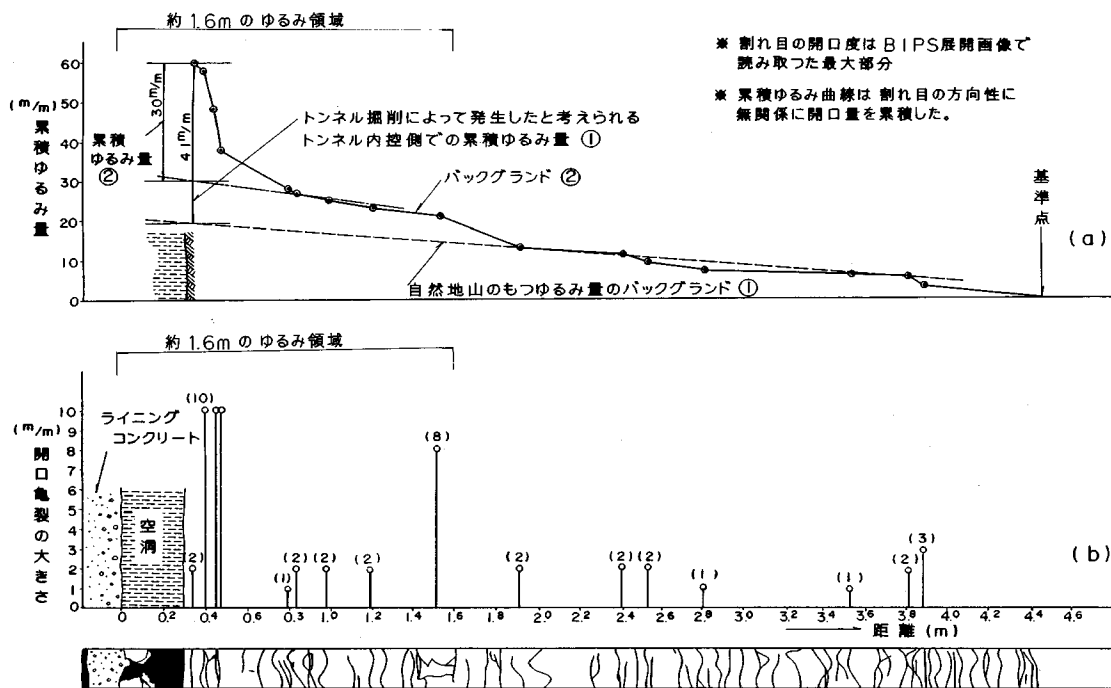


図-3 開口亀裂の分布と累積ゆるみ量の推定図

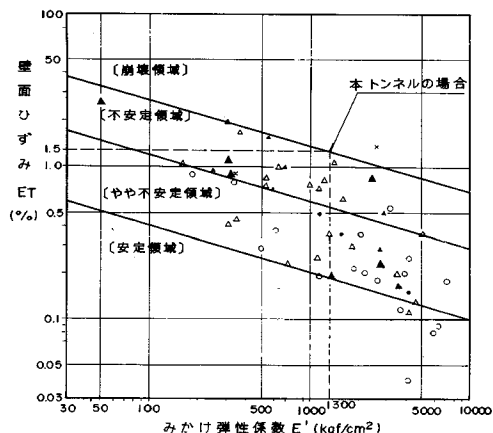


図-4 NATMにおけるみかけ弾性係数 (E') と壁面ひずみ (E_T) との関係

を防ぐものとした。

これら補強対策の応用については、表-1 右欄に示し、おのおのについて説明を加える。

(1) 卓越する片理面の走向(トンネル軸線に対して)

卓越する片理面のトンネル軸線に対する走向傾斜は $N 10^\circ \sim 60^\circ E$ および $10^\circ \sim 20^\circ SE$ に集中し、トンネル軸線 ($N 50^\circ E$) に対しほぼ平行であることが判明した。この傾向は No.1 孔のダイヤグラムで顕著に表われるため、ロックボルトの打設範囲は始点側から中央部にか

表-1 BIPS による調査結果と補強対策への応用

調査項目	BIPS による調査結果	補強対策への応用
1) 卓越する片理面の走向(トンネル軸線に対して)	トンネル軸線に対してほぼ平行する区間が No.1 孔で顕著(始点側~中央部)	ロックボルト打設範囲の判断(始点~中央部)
2) 卓越する片理面の傾斜(トンネル横断面に対して)	トンネル横断面に対して天端から右肩部に $10^\circ \sim 20^\circ$ で緩傾斜	ロックボルト打設の主方向の判断
3) ゆるみ領域	既設トンネル背面 1.6m までゆるみ領域が存在する。	ロックボルトの長さの判断
4) 空洞の規模	・始点側坑口(No.1 孔)で約 40cm ・中央部 約 10~15cm(トンネル天端~右肩部) ・終点側坑口で約 1.1m	既設トンネル背面のエアモルタル限定注入(終点側坑口付近)

ての区間に必要であると判断した。

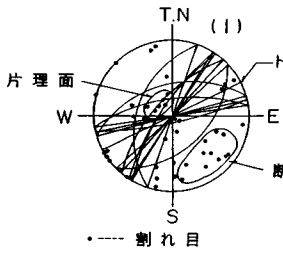
(2) 卓越する片理面の傾斜(トンネル横断面に対して)

片理面の傾斜が $10^\circ \sim 20^\circ SE$ であるため、ロックボルトはそれに直交する $70^\circ \sim 80^\circ NW$ の方向に有効であると考えられる。

これは、トンネル横断面に対して天端より右肩部にかけて ($\theta \approx 30^\circ$) の方向になる。

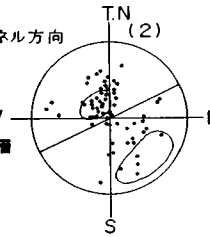
また、開口亀裂がその他の区間でも $10^\circ \sim 20^\circ SE$ 方

(1) 地表に分布する不連続面
(地表踏査結果より)

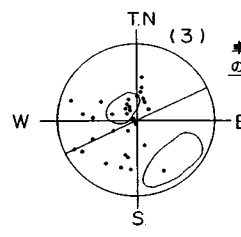


(2) BIPS測定結果による
不連続面

① NO.1 孔



② NO.2 孔



卓越する片理面の走向傾斜

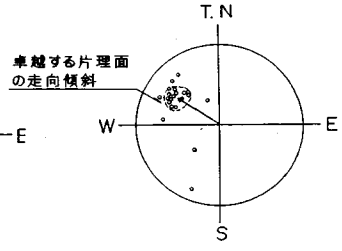


図-5 Oトンネルにおける不連続面の方向

走向-N40°~60°E
傾斜-10°~20°SE

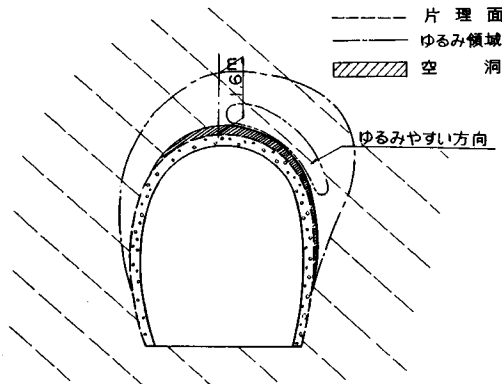


図-6 片理面の卓越する方向とゆるみ領域

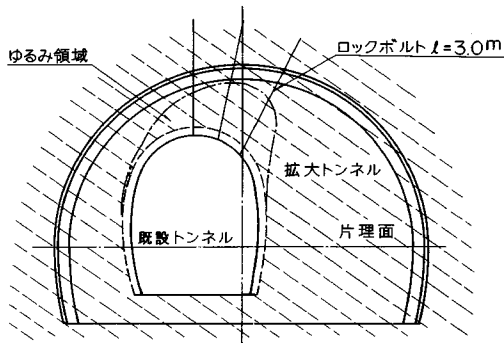


図-8 補強ボルトの長さや施工範囲

内空近傍の片理面

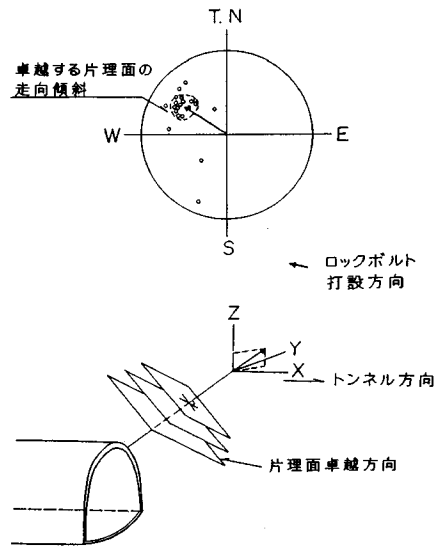


図-7 亀裂解析とロックボルト打設方向の模式図

向に集中していることが明確になった。

これらの調査結果からロックボルト打設の主方向は天端より右肩部30°の方向が妥当であると判断した。

(3) ゆるみ領域

開口亀裂を累積ゆるみ量として考えると特に背面1.6mの地点からゆるみ量が急に増加し、それ以深の岩盤では少なくなっている事実から、ゆるみ領域が1.6mであると判断した。

よって、ロックボルトの長さを新鮮岩盤に1m程度定着させ、 $l=3.0m$ とし、ゆるみ領域の拡大を防ぐも

のとした。

(4) 空洞の規模

終点側坑口では約1.1mの大規模な空洞が存在するため、エアーモルタルを充填することで覆工と地山とを一体化させ、応力集中を避けるものとした。

6. まとめと今後の課題

拡大施工に先だち、既設トンネル背面の岩盤状況をBIPSで画像処理した結果、卓越した亀裂の走向傾斜、およびゆるみ領域の推定に有効であることが判明した。その調査結果から補強対策の施工範囲と方向が調査の段階で示唆できた。

以下に調査例のまとめと今後の課題について述べる。

(1) 卓越した片理面の走向はN40°~60°Eに集中し、トンネル軸線(N50°E)に対し、ほぼ平行である。この傾向はNo.1孔のダイヤグラムで顕著であるため、

補強対策の施工範囲が特定できた。

(2) 卓越した片理面の傾斜は 10° ~ 20° SEであるためそれに直交する 70° ~ 80° NEの方向が変状しやすいと判断された。

これは、トンネル横断面に対するロックボルトの主方向が判断できたことになる。

(3) 開口亀裂の大きさをトンネル背面からの距離で、累積ゆるみ曲線として表現した場合、特に1.6mの地点が急に増加する位置であると読み取れる。

この調査結果から背面のゆるみ領域は1.6mと把握できた。

よって、ロックボルトの長さを新鮮岩部に1m程度定着させ、 $l=3.0$ mとし、ゆるみ領域の拡大を防ぐものとした。

今後、既設トンネルの拡大施工時、および近接施工時にBIPSを用いることによって、事前と事後の地山状況の変化を比較すれば、補強対策の妥当性の確認ができる。

さらに、最近注目を浴びている地下大規模断面（地下換気所、石油備蓄基地等）補強対策への応用が可能となろう。

これらの調査例と補強対策への応用について研究し、機会があれば発表したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) たとえば、菊地・水戸・黒田：節理分布の確率統計学的評価に基づく節理性岩盤のモデル化，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.151~157，1987.
- 2) たとえば，吉中・吉田・藤田：岩盤不連続面の方向性に関する分布特性の評価とそのブロック理論への応用，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.145~150，1987.
- 3) たとえば，大野・小島：フラクタルを考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.157~167，1987.
- 4) たとえば，谷本・畠・刈谷：孔内載荷試験結果の評価に関する考察，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.6~10，1982.
- 5) 谷口・亀和田・米田・国分：既設トンネル老朽度の調査手法の開発，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.191~195，1989.
- 6) 土木学会関西支部：都市トンネルへのNATMの適用，pp.18，1987.

(1989.2.21・受付)