

山岳トンネルにおけるゆるみ現象の調査 —舞子トンネル中南工事の分析例—

Research on the loosening phenomenon in surrounding rock masses of mountain tunnels

— An analysis of the south central Maiko tunnel project —

西村正夫*・蛭子清二*・岩垣富春**・斎藤敏明***

Masao NISHIMURA, Seiji EBISU, Tomiharu IWAGAKI and Toshiaki SAITO

For the design and construction of the mountain tunnels, it is important to know the size and the mechanical property of the loosening zone formed in surrounding rock masses. However, it is thought that the change in the condition of surrounding rock masses and the forming process of the loosening zone caused by the tunnel excavation have not been sufficiently explained. Fortunately, the chance to investigate the condition change of crack distributions at the same position of surrounding rock masses was obtained before and after the tunnel was being widened. In this article, the result of investigations and of the analysis of the loosening phenomenon in medium and hard rock masses are presented, and the basic data is offered to give a better understanding of the loosening phenomenon.

Keywords : mountain tunnel, loosening phenomenon, crack distribution, BTV

1. はじめに

山岳トンネル工事の設計施工に際して、ゆるみ領域の大きさと力学的な特性を正確に知ることが重要である。櫻井や谷本ら¹⁾によってゆるみ現象が定性的に説明されているが、掘削による岩盤の具体的な状態変化やゆるみ領域の形成過程を正確に予測するためには、多くの課題が残されていると考えられる。

ゆるみ現象の測定には、弾性波探査²⁾が多用されてきた。最近では、ボーリング孔内載荷試験³⁾、透水試験³⁾、A E (Acoustic Emission) 測定⁴⁾、微小ひずみ測定⁵⁾、真空透気試験⁶⁾なども適用されている。一方、ボアホールテレビビューアーを適用して、岩盤内の不連続面の状態変化を直接に可視化して調査する方法も可能となってきた^{7), 8), 9)}。

本州四国連絡道路の舞子トンネル中南工事では、トンネルが拡幅された前後に、周辺の岩盤の同じ位置で不連続面の分布状態の変化を可視化し直接に調査する機会を得た。本報告では、舞子トンネルの周辺岩盤を対象にゆるみ現象の調査結果を具体的に示し、ゆるみを評価するための基礎的資料を提供する。なお、ここでは、岩盤に内在する不連続面を便宜的に亀裂面と呼ぶことにする。

2. 舞子トンネルの概要

舞子トンネル中南工事では断面積117 m²、延長約600 mの双設トンネルが施工された。図-1の横断に示すように、最初にTBM工法で直径5mの導坑が上下線各2本の合計4本(No. 1～No. 4導坑)掘削された。その後、制御発破工法、スロット発破工法、スロットブレイカー工法で導坑は本坑断面に拡幅された。なお、舞子トン

* 正会員 工博 株式会社奥村組, ** 本州四国連絡橋公団, *** 正会員 工博 京都大学工学部

ネル周辺の岩盤には、中生代白亜紀の堅硬な六甲花崗岩がほぼ一様に分布している。

3. 亀裂調査の方法

拡幅前の No. 1 導坑で 2 種類の亀裂調査を行った。1 つは、先進導坑画像計測システム^{10), 11)}による調査である。4 本の導坑周壁の亀裂分布を延長約 600 m に渡って CCD カメラで撮影した。もう 1 つは、導坑の左側壁部で区間が 5 m のより狭い範囲（以後、詳細調査区間と呼ぶ）の岩盤を対象とし、小口径ボアホール画像計測システム¹¹⁾を適用した調査である。この区間で図-1 に示したボーリング（直径 66 mm、長さ約 5 m）を 4 本行い、小型の CCD カメラで孔壁の亀裂分布を撮影した。なお、ボーリング孔の内の 2 本では孔壁に蛍光剤を塗布浸透させた後に紫外線を照射して亀裂をより鮮明に可視化する蛍光法¹²⁾を併用し、残りの 2 本には真空透気試験⁶⁾を併用した。詳細調査区間の導坑は制御発破工法で拡幅された。拡幅後、岩盤に残った 4 本のボーリング孔で拡幅前と同様に亀裂分布を調査した。詳細調査区間の施工時期を表-1 に、調査時期を表-2 に示す。なお、4 本のボーリング孔を距離程の小さいものから順に No. 1 孔～No. 4 孔と呼ぶ。

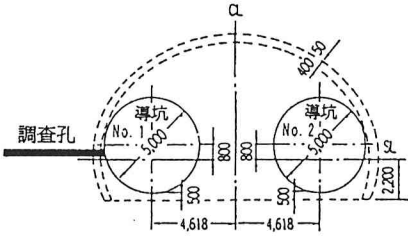


図-1 導坑の標準横断面図

表-1 詳細調査区間の施工時期

	施工時期
導坑の掘削	平成 3 年 4 月 3 日
導坑の拡幅	上半：平成 6 年 5 月 31 日 下半：平成 6 年 6 月 10 日

表-2 ボーリング孔の調査時期

	No. 1, No. 4 (真空透気試験用)	No. 2, No. 3 (蛍光法試験用)
拡幅前	平成 5 年 10 月 31 日	平成 6 年 4 月 16 日～17 日
拡幅後	平成 6 年 9 月 4 日	平成 6 年 12 月 3 日～4 日

4. 調査結果と分析

4.1 導坑周壁の亀裂分布

No. 1 導坑周壁の展開画像を図-2 に示す。展開画像から亀裂の走向と傾斜を求めシュミットネットの下半球極に投影して図-3 に示す。亀裂は、第 1 卓越方向が NS 走向で垂直傾斜、第 2 卓越方向が N 60° W 走向で垂直傾斜の方向に集中することが 4 つの導坑に共通して見出せた。導坑の周壁では亀裂面とその周辺にのみ風化・変色を受けた痕跡が認められたこ

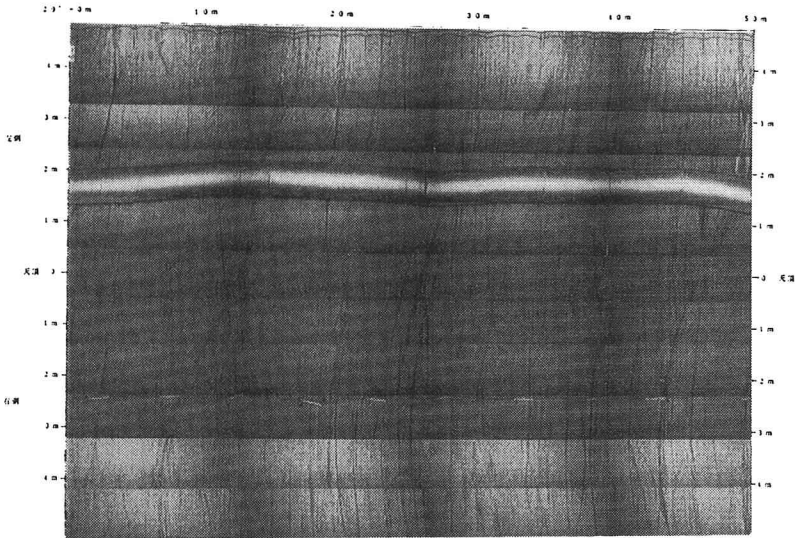


図-2 No. 1 導坑の周壁展開画像

とから、上記した2つの亀裂群はTBMによる掘削で新たに生じたものではなく、掘削前から岩盤に存在していた可能性が考えられる。

4.2 ボーリング孔周壁の亀裂分布

図-4に導坑拡幅前後のボーリング孔の亀裂の方向と位置を対比して示す。縦軸はボーリング孔軸方向の拡幅後のトンネル壁面からの距離、横軸はトンネルの距離程である。拡幅前に測定した亀裂を破線、拡幅後のそれを実線で示し、拡幅後に測定した亀裂の傾斜角を併記した。破線と実線で位置と方向が近い亀裂の組は拡幅の前後で同じものを測定したと判断した。一方、拡幅後に測定した6本の亀裂には同図で矢印を付して示した。拡幅後に新たに測定した亀裂が拡幅前に測定した亀裂と近い位置にある傾向を見出せる。一方、拡幅前後に測定した亀裂の走向と傾斜をシュミットネットの下半球極に投影し、図-5に示す。同図では、拡幅前の亀裂を白丸、掘削で無くなった亀裂を矢印、拡幅後に増えた亀裂を黒丸で示した。拡幅前後のデータが揃っているNo.1～No.3ボーリング孔の亀裂を比較すると、拡幅後に増えた6本の亀裂の走向と傾斜が拡幅前に測定した亀裂のそれらに近いことがわかる。以上のことから、拡幅前に画像計測システムで測定できなかった閉じた亀裂か開口幅の小さな亀裂が、導坑の拡幅掘削で識別できるようになったと考えられる。

4.3 導坑とボーリング孔の調査結果の比較

導坑で測定した亀裂の方向（前掲の図-3）と、拡幅前のボーリング孔で測定した亀裂の方向（前掲の図-5）を比較する。導坑とボーリング孔ともに亀裂の傾斜角に大きな差はない。しかし、走向の卓越方向には明らかな違いを指摘できる。ボーリング孔では、導坑で測定した第1および第2卓越方向の両方向が測定されたが、導坑とは異なり第2卓越方向の亀裂が多かった。両方の測定でほぼ同じ性能のCCDカメラを用いたので、撮影の対象規模（断面が大きな導坑と小さなボーリング孔）の違いが測定結果の相違として現れたと考えられる。すなわち、導坑では開口幅が大きな亀裂が選択的に測

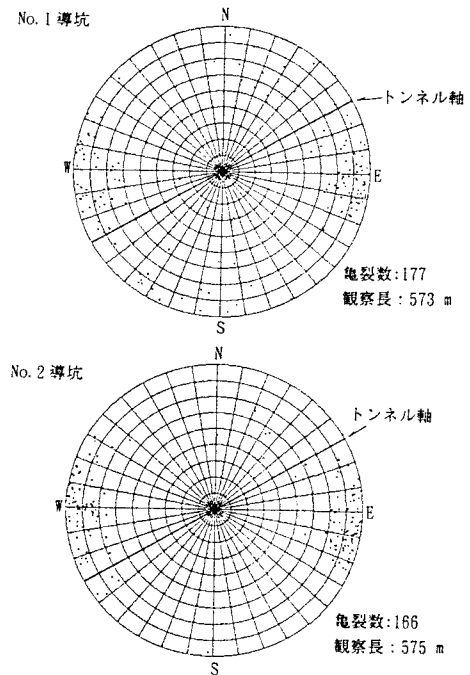


図-3 導坑周壁で測定した亀裂の方向
(シュミットネットの下半球極投影)

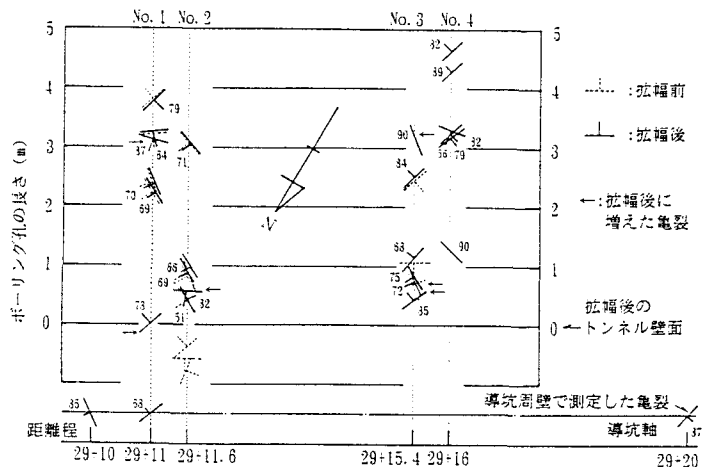


図-4 ボーリング孔壁で測定した亀裂の走向・傾斜、位置
(詳細調査区間)

定された可能性が高いと考えられる。これに対して、ボーリング孔では、開口幅と風化・変色の痕跡を容易に認識できた亀裂と、注意深く画像を見ないと認識が困難であった開口幅の小さな亀裂の両方が測定されたと考えられる。

4.4 蛍光法、真空透気試験の適応性

ボーリング孔壁の同じ位置で、蛍光法¹²⁾を適用し紫外線を照射した場合と可視光のみ照射した場合の展開画像を比較して図-6に示す。紫外線を照射した場合に可視光では測定できなかった亀裂が捕らえられている。ただし、同法の適用にあたってはボーリング孔壁に塗布された蛍光剤の除去方法に課題が残された。

図-7はNo. 1 ボーリング孔に適用した真空透気試験⁶⁾から測定した固有透過度の分布と実際の亀裂位置との関係を拡幅掘削の前後で比較したものである。拡幅前の固有透過度の分布と亀裂位置は必ずしも一致していないが、拡幅後に固有透過度が増加した位置と新たに測定された亀裂の位置との間には関連性が認められた。

5. まとめ

舞子トンネルの周辺岩盤で導坑の拡幅掘削の前後に亀裂分布性状の変化を測定した。その結果から、同トンネルにおけるゆるみ現象が掘削前から存在していた亀裂面の開口であった可能性が高いと推定した。また、亀裂調

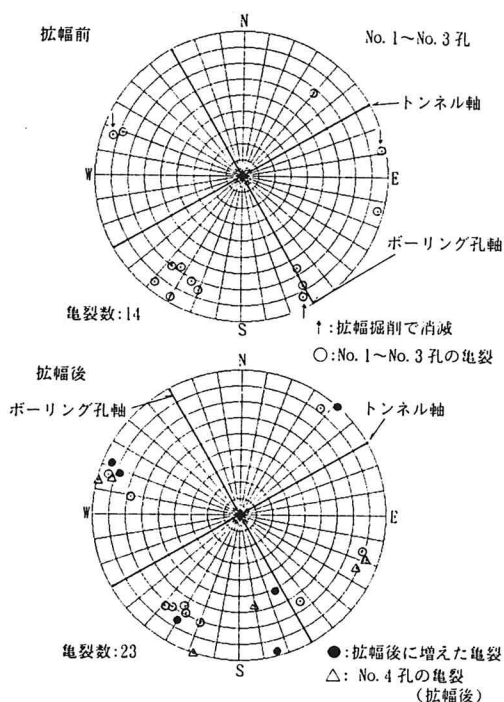


図-5 拡幅前後におけるボーリング孔壁の亀裂方向の比較
(シュミットネットの下半球極投影)

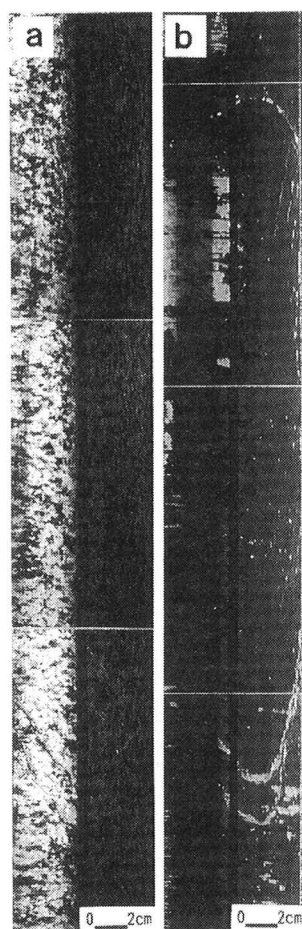


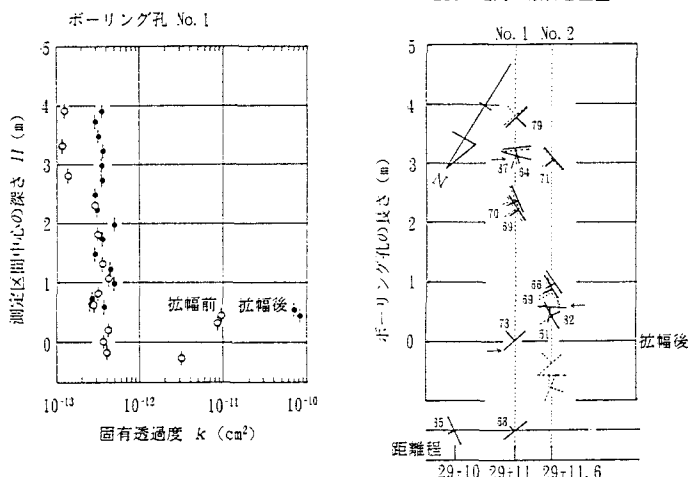
図-6 蛍光法を併用したボーリング孔周壁展開画像の1例¹²⁾
(aは可視光、bは紫外線を照射した結果)

査の規模に依存して測定結果の亀裂分布性状が異なることが見出され、トンネルの条件（形状、断面積、土被りなど）や岩盤の特性に応じて、工学的に重要視すべき亀裂の規模と最適な調査方法の組合せが存在する可能性が示唆された。

最後に、蛍光法に関しては京都大学工学部 西山孝 教授に、真空透気試験に関しては神戸大学工学部 中山 昭彦 助教授にご指導とご協力を頂きました。深く感謝します。

参考文献

- 1) 櫻井春輔他：トンネル・地下空洞における岩盤の緩みとは？，土木学会第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 378～387，1991.
- 2) ゆるみ領域特別小委員会編：トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書（関西電力株式会社委託），（社）日本トンネル技術協会，1979.
- 3) 吉岡尚也・杉原弘造・谷本親伯・木山英郎：空洞周りの緩み域の現場計測とその評価方法について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 617～622，1994.
- 4) 岩井孝幸・青木謙治（勝山邦久編）：現場技術者のためのA E技術の応用，株式会社アイピーシー，pp. 292～317，1994.
- 5) 石田毅・金川忠・矢田篤・田仲正弘：空洞掘削時の応力再配分に着目したゆるみ域測定法の提案，土木学会論文集，No. 457/Ⅲ-21，pp. 41～50，1992.
- 6) 山田文孝・山地宏志・中山昭彦：真空透気試験を用いたゆるみ領域の評価，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 289～294，1994.
- 7) 平川芳明・浦山克・打田靖夫・吉田次男・金川忠：大規模地下空洞掘削時のゆるみ領域の進展に関する一考察，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 695～700，1994.
- 8) 内田靖夫・吉田次男・浦山克・平川芳明：空洞掘削時の岩盤不連続面の進展性状に関する一考察，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 713～718，1994.
- 9) 日比野敏・本島睦：空洞掘削時の岩盤挙動の特性，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 689～694，1994.
- 10) 寺田道直・水原憲三・萩森健治・大塚勝司：画像処理によるTBM掘削壁面の地質調査，第13回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp. 60～63，1992.
- 11) 小林義美・寺田道直：画像処理による地質予知システムの開発，センサー技術，情報調査会，Vol. 13 No. 4，pp. 23～27，1993.
- 12) 西山孝・楠田啓・陳友晴・寺田道直・蛭子清二・萩森健治：蛍光法を適用したボアホールテレビジョンシステムの開発，応用地質，36巻6号，pp. 46～51，1996.



図ー7 真空透気試験による固有透過度と亀裂分布の対比
(No. 1 ボーリング孔)