

山岳トンネルの二重支保工の設計に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5～令 7

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：日下敦、小泉悠

山岳トンネルの建設において、断層・破砕帯等の押出し性や膨張性の著しい地山条件下で「二重支保工」が適用される事例が増加傾向にある。二重支保工とは、掘削直後に設置する通常の支保工（一次支保工）の内側に、二重目の支保工（二次支保工）を設置する工法で、支保工の耐荷力の向上や地山の変形抑制に有効であるとされる。設計・施工にあたっては、一次及び二次支保工の仕様とともに、両者の設置離隔を適切に設定する必要がある。施工事例を分析すると、この設置離隔は最短 3m の事例もあれば、最長 35m 程度の事例もあり、類似事例の参照等により、現状、現場ごとに定められていると考えられる。

本研究では、二重支保工の設計の合理化、すなわち施工の安全を確保したうえで支保工の規模を小さくすることを目的として、上述した設置離隔に着目した事例分析、模型実験及び数値解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 二重支保工が適用された約 10 事例を分析した。設置離隔の設定にあたっての設計の考え方を抽出整理し、大別して「①作用荷重に対する一次支保工と二次支保工の耐荷機能の一体性」「②二次支保工の健全性」が考慮されていることを示した（論文リスト b-1）。
- ・ 二重支保工を模擬した概ね 1/20 スケールの模型（設置離隔：短・長）を作製し、二次元の載荷実験を実施した。計測したひずみ等の分析より、設置離隔が短い場合、①の効果が強く発揮される一方、一次支保工よりも先に二次支保工が圧縮破壊した。設置離隔が長い場合、②の効果が強く発揮され、二次支保工の圧縮破壊は遅れて発生した。いずれの場合も、破壊に至る耐荷力は通常の一重の模型の 2.1～2.2 倍であった（論文リスト b-1、c-1）。
- ・ 二重支保工の設置離隔をパラメータ（4m、8m、15m）とした三次元逐次掘削解析を実施した。実施した解析条件下では、地山の変形抑制効果に大きな差は生じなかった。一方、二次支保工の発生応力に着目すると、設置離隔 4m の場合、比較的大きな応力が発生する等、ケース間で有意な差が認められた（論文リスト c-1）。
- ・ これらの留意事項を技術基準類に提案するとともに、二重支保工を適用中の現場からの技術相談に対応し、押出し性や膨張性の著しい地山条件下での施工の安全確保及び経済性の向上に貢献した。

キーワード：山岳トンネル、二重支保工、設置離隔、模型実験、数値解析

DESIGN OF DOUBLE SUPPORT METHOD IN MOUNTAIN TUNNELS

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Tunnel Research Team,

Road Technology Research Group

Author: KUSAKA Atsushi

KOIZUMI Yu

Abstract: In case of tunnel construction in the extremely squeezing and/or swelling ground conditions, double support method, where secondary support is installed inside primary support, could be applied. According to our case studies, where double support method had been applied, the installation distance between primary and secondary support varied in the wide range from only 4m to more than 30m.

In this research, we conducted case studies, model experiments and numerical analyses, focusing on the installation distance between primary and secondary support to suggest the optimized design for double support method. The results were summarized as follows.

- Approximately 10 case studies, where double support method had been applied, were analyzed. It was found that “the load-bearing collaboration between primary and secondary support” and “the soundness of secondary support” were mainly considered to determine the installation distance.
- Loading experiments using 1/20-scale double-layered tunnel models, namely Case1 and Case2 which were to represent the short and long installation distances, were conducted. From the result of Case1, the secondary support model was destroyed by compression when the load was 510kN, prior to the destruction of the primary support model at 700kN. From the result of Case2, after the destruction of the primary support model, the secondary support model started resisting the load and was destroyed by compression when the load was 730kN. The load-bearing capacities of the two cases were 2.1-2.2 times of that of the standard single-layered model.
- Three-dimensional numerical analyses, where the installation distances were 4m, 8m and 15m, were conducted. As a result, a significant difference was found between the three cases in terms of the stress of the secondary support.
- These findings would contribute to the safety and the reasonable cost of tunnel construction in the squeezing and/or swelling ground conditions.

Keywords: Mountain Tunnel, Double Support Method, Installation Distance, Model Experiment, Numerical Analysis

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

査読付論文・海外（計 1 本）

- b-1) Yu Koizumi, Atsushi Kusaka and Nobuharu Isago: Loading Experiments on Installation Distance between Primary and Secondary Support for Double Support Method, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2026, Accepted, 2026.5

査読無し論文・国内（計 1 本）

- c-1) 小泉悠、日下敦：二重支保工の適用における二次支保工の設置時期に着目した載荷実験、トンネル工学報告集、第 34 巻、I-23、pp.1-12、2024.12

学会発表等その他（計 1 本）

- e-1) 小泉悠、日下敦：数値解析による二重支保工の施工サイクルに関する一考察、令和 7 年度土木学会全国大会 第 80 回年次学術講演会、Ⅲ-157、2025.9