

補強したトンネル支保工の全体耐力に関する要素実験

(独)土木研究所

正会員

○日下敦

同

正会員

砂金伸治

同

正会員

真下英人

同

角湯克典

1. はじめに

トンネルに過大な外力が作用し、当初施工した支保工のみでは地山の安定性が確保できないと判断された場合は、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工等による補強工が施工されることがある。しかし、補強工の規模が決定される際は、既に損傷を受け、大きなひずみが発生している当初の支保工が補強後に分担し得る荷重が不明確であることから、経験的な知見に依るところが多いのが現状である。本稿では、支保工にひずみが発生している状態で補強工を施工した場合の全体の耐力について、要素実験により検討した結果を報告する。

2. 実験方法

本研究では、トンネルが軸圧縮力が卓越することの多い構造物であることを踏まえ、基礎的な検討として図-1 に示すように一軸圧縮場の要素実験を行った。

支保工と補強工はそれぞれ載荷総断面積 450cm² の直方体とし、いずれも基準強度 18 N/mm² の同一バッチのプレーンコンクリートで供試体を作製した。実験ケースによっては支保工と載荷板の間には剛なスペーサーを設置した。このスペーサーによって、載荷初期段階では支保工にのみ荷重が作用し、支保工に所定のひずみが発生した段階で補強工にも荷重が作用することになる。なお、支保工と補強工は数 mm 程度の間隔を空けて設置している。

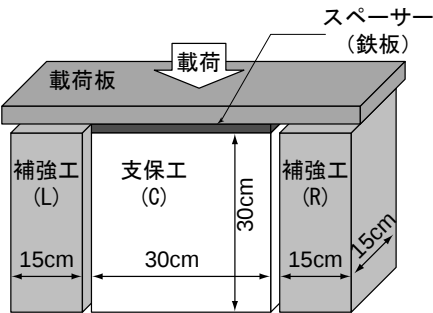


図-1 実験の概要

表-1 実験ケース

ケース No.	支保工	補強工	材料強度 (N/mm ²)	スペーサー 厚さ (mm)	実効スペーサー ひずみ※ (μ)
1	あり	—	15.1	—	—
2		—	15.8	—	—
3		あり	17.6	0.3	400
4		あり	17.0	0.9	1760

※載荷板が補強工に接触した時点の支保工のひずみ

実験ケースを表-1 に示す。ケース 1 は支保工のみである。ケース 2 は支保工と補強工を同時に設置した場合を想定している。ケース 3 および 4 は、スペーサーを設置し、それぞれ支保工のひずみが小さい段階および大きい段階で補強工を設置した場合を想定している。なお、後述するように、補強工に載荷板が接触した時点の支保工のひずみは、ケース 3 では 400 μ，ケース 4 では 1760 μ であった。

3. 実験結果

図-2 は、載荷板の荷重-変位関係を示したものである。支保工単体のケース 1 と比較すると、ケース 2, 3 は 2 倍以上、ケース 4 は約 1.9 倍となっており、いずれも支保工単体の耐力よりも大きな最大荷重となっていることが分かる。なお、ここで示した変位については、載荷板

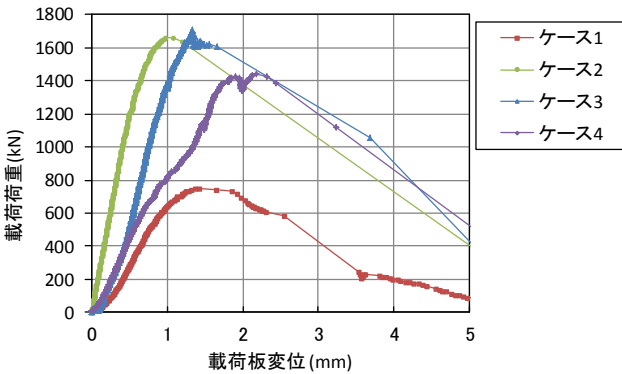


図-2 載荷板の荷重-変位曲線

と供試体のいわゆる「なじみ」の問題もあり、変位を供試体高さで除したものが供試体のひずみと一致するものではない。

図-3 は、載荷荷重と、支保工および補強工に発生したひずみの関係を各ケースで示したものである。ひずみは載荷軸方向の直ひずみ（引張が正）で、高さ方向中心位置で前面・背面・両側面に貼付したひずみゲージの平均値である。

ケース 1 は、単純な支保工の一軸圧縮試験に相当するものであり、約 $2,500\mu$ のひずみで最大荷重 750 kN に到達している。この値は支保工単体で受け持つことができる最大荷重と言える。また、補強工の総断面積が支保工の断面積と同一であることを考慮すると、補強工単体で受け持つことができる最大荷重も同等と考えられる。

ケース 2 は、載荷と同時に支保工・補強工ともひずみが発生し、全て $2,000\mu$ を超過したところで最大荷重 $1,670\text{ kN}$ に到達している。最大荷重はケース 1 のほぼ 2 倍であり、支保工と補強工がともに同等の荷重を分担したものと考えられる。

ケース 3 は、荷重 300 kN の時点から徐々に補強工にもひずみが発生している。両補強工に相応のひずみが発生した時点（ここでは 20μ を敷居値とした）を補強工に載荷板がタッチした時点と定義すると、この時点では荷重 350 kN であり、支保工には 400μ のひずみが発生している。本ケースでは、支保工のひずみが $2,000\mu$ を超えた時点で最大荷重 $1,710\text{ kN}$ に到達している。最大荷重はケース 2 とほぼ同等であり、支保工が比較的健全な段階で補強工を施工することで、両者の耐力をともに生かした補強が可能になると考えられる。

ケース 4 は、荷重 835 kN 、支保工のひずみ $1,760\mu$ の時点で補強工にも荷重が作用し始めている。ケース 1 の最大荷重である 750 kN と比較すると、支保工は耐力に近い荷重をこの時点で既に分担していると考えられる。本ケースでは、支保工のひずみが $2,600\mu$ を超えたあたり（荷重約 $1,100\text{ kN}$ ）から支保工のひずみの増加が止まっており、この時点以降の荷重増分は支保工が分担できなくなっていると考えられる。一方で補強工は $1,100\text{ kN}$ 以降もひずみが増加しており、補強工が荷重増分を分担していると考えられる。最大荷重は、補強工のひずみが $2,000\mu$ を超えたところで発生し、 $1,440\text{ kN}$ であった。この値は支保工単体、補強工単体で受け持つことができる最大荷重を大幅に超えている。補強工が荷重を分担し始めた時点で支保工はほぼ耐力に近い荷重を分担していたことを考慮すると、支保工は耐力到達後も一定の荷重を分担していたと考えられる。換言すれば、支保工が耐力に近い状態で補強工を施工する場合でも、支保工のピーク後の耐力を考慮することで、より経済的な補強工の設計につながる可能性があると考えられる。

4. おわりに

本稿では、非常に単純化した一軸圧縮場の要素実験ではあるが、支保工にひずみが発生している状態で補強工を施工した場合の全体の耐力について議論した。その結果、支保工に発生しているひずみが小さい段階で補強工を施工した場合は、両者の単体の耐力を合計した荷重まで全体耐力が期待できることが分かった。また、支保工に降伏に近いひずみが発生している段階で補強工を施工した場合でも、支保工のピーク後の耐力が期待できる場合は、損傷を受けている支保工の耐力も補強後の全体の耐力に考慮できる可能性があることが明らかになった。今後は、実トンネルの補強工の設計法に資するよう、支保工と補強工の剛性や耐力が異なる場合の検討や、アーチ形状での検討を行いたいと考えている。

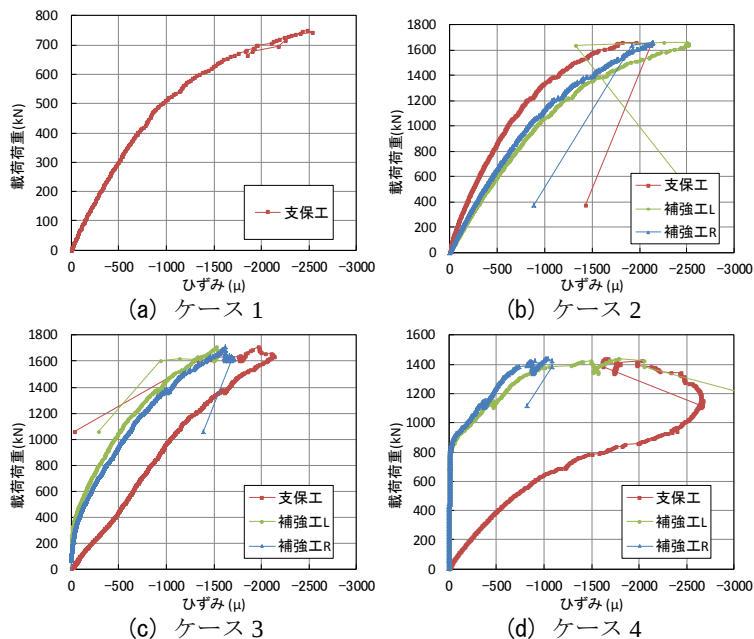


図-3 各ケースの荷重-ひずみ関係