

内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析

(独)土木研究所 正会員 ○日下敦, 砂金伸治, 真下英人

1. はじめに

トンネルに過大な外力が作用し、当初施工した覆工のみではトンネルの安定性が確保できないと判断された場合は、内巻き補強が行われることがある。その際、既にひずみが発生している覆工も補強後にある程度の荷重を分担することにより、全体の耐力は覆工単体や補強工単体の耐力を上回る可能性があることを、筆者らは要素レベルの室内実験により指摘している^{1), 2)}。本稿では、補強後の実構造物における全体耐力の検討に先立ち、要素レベルの実験の再現解析を試みたので、その結果を報告する。

2. 再現する要素実験の概要

要素実験²⁾は、図-1に示すように、覆工と、荷重の安定性の理由から2分割した補強工により構成され、いずれも基準強度 18 N/mm² のプレーンコンクリート製の直方体である。荷重は上面の載荷板より加えられるが、ケースによっては載荷板と覆工の間にスペーサー（鉄板）を設置することにより、載荷初期は覆工にのみ荷重が作用し、覆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。すなわち、押し出し性地山等で連続的に覆工に荷重が作用するような条件下で、覆工にある程度のひずみが発生した段階で内巻き補強を実施するといった状況を想定している。

本稿で解析対象とする実験は表-1の2ケースである。ケース1は覆工のみを想定したケース、ケース2はスペーサーを設置して、覆工に約 2,000 μ のひずみが発生した段階で補強工にも荷重を分担させたケースである。実験における全体荷重と載荷板変位の関係は図-2に示すとおりである。なお、両ケースとも、供試体中央部でひずみゲージにより測定したひずみが、覆工および補強工とも 2,000 ~ 2,500 μ を超過したところで全体の破壊に至った。

3. 解析の概要

上記の実験ケース2においては、供試体のポストピーク強度が全体耐力に大きく影響を及ぼしていることから、ここではポストピーク特性を表現できる解析手法を採用した。

解析は、非線形解析における解の収束において比較的に有利な有限差分法プログラムにより行い、図-3に示す3次元メッシュを用いた。補強工については、載荷前に剛性0の要素としてモデル化しておき、所定のひずみが覆工に発生した時点で剛性を有する要素に変更することで、実験条件を再現した。

供試体材料（覆工および補強工）はひずみ硬化/軟化モデルを適用し、表-2に示す初期物性値を用いるとともに、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレーション角 ψ については図-4に示すように塑性ひずみの関数と仮定した。これらの物性値は、文献^{3), 4)}を参考に、実験の結果を再現できるように決定したものである。

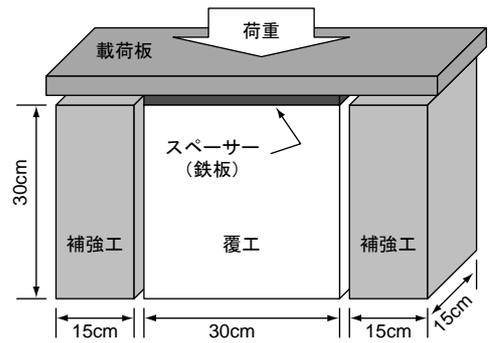


図-1 再現する実験の概要

表-1 実験ケース

ケース No.	覆工	補強工	材料強度 (N/mm ²)	スペーサー 厚さ (mm)
1	あり	—	15.1	—
2	あり	あり	20.3	1.5

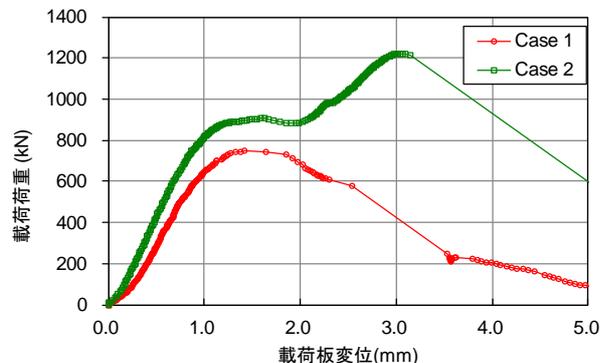


図-2 要素実験における載荷板の荷重-変位曲線

キーワード トンネル, 覆工, 補強工, 耐力, ひずみ硬化, 数値解析

連絡先 〒305-8516 つくば市南原 1-6 (独)土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) TEL 029-879-6791

なお、ひずみ硬化/軟化特性の決定にあたっては、文献³⁾による以下のような考え方を念頭に置いた。コンクリートが圧縮によるせん断破壊を生じる際、まず微細なひび割れが生じ、その後ひび割れが進展する。この過程において、セメント結合が徐々に失われるので、 c も徐々に消失する。それに伴って、もともとセメントで固化されていたコンクリートは次第に粒状に似た性質を持つようになるので、 ϕ は増加する。同時に体積膨張を示すので ψ を持つようになるが、破壊が進むと体積膨張はほとんど生じなくなる。これらの値を直接的に算定するのは困難であるが、コンクリートに対しては概ね c は一軸圧縮強度の0.3倍、 ϕ は30~35°、 ψ は0~20°程度であることが示唆されている。

4. 解析結果

図-5に、解析で得られた載荷荷重と載荷板変位の関係を示す。ケース1は覆工単体での一軸圧縮試験に相当し、最大荷重828 kNを載荷面積450 cm²で除すると、18.4 MPaとなる。また、最大荷重時の変位は0.6 mmであり、供試体高さの300 mmで除すると、2,000 μ に相当する。加えて、最大荷重到達後も、ひずみ軟化を示しながらある程度の荷重を負担できる解析モデルであることを示している。

ケース2は、覆工のひずみが2,000 μ となった時点で補強工を設置したケースである。覆工が最大荷重に達したところで補強工が設置され、ケース1の約1.6倍の1,348 kNで最大荷重に到達している。覆工が負担している荷重と補強工が負担している荷重の合計値が全体の載荷荷重であることを考慮すると、覆工が最大荷重に達したところで補強工が設置された本ケースにおいては、補強工設置後も覆工がある程度の荷重を分担しているものと推察される。

これらの値は、図-2に示した実験の値と良好に一致しており、覆工にひずみが生じている状態で補強工を設置した場合の全体の耐荷力について、本稿で示した解析モデルにより検討できる可能性があることを示している。

5. おわりに

本稿で示した解析モデルを用いることで、覆工にひずみが生じている状態で補強工を設置した場合の全体の耐荷力について、要素レベルで再現できる可能性があることが分かった。今後は実構造物における覆工自体の耐力や補強後の全体耐力について検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 24760385 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 日下敦, 砂金伸治, 真下英人, 角湯克典: 補強したトンネル支保工の全体耐力に関する要素実験, 土木学会年次学術講演会概要集, 第66回, 第3部門, pp.211-212, 2011.
- 2) Kusaka, A., Isago, N., Mashimo, H.: Laboratory tests on total load-bearing capacity of tunnel's damaged permanent lining reinforced with additional lining, *In Proceedings of 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, ARMA13-482, 2013. (in press)
- 3) Vermeer, P. A., R. de Borst: Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock, *Heron*, Vol.29, No.3, pp.3-64, 1984.
- 4) Kias, E.M.C., Gu, R., Garvey, R., Ozbay, U.: Modeling unstable rock failure during a uniaxial compressive strength test, *In Proceedings of 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, pp.825-833, 2011.

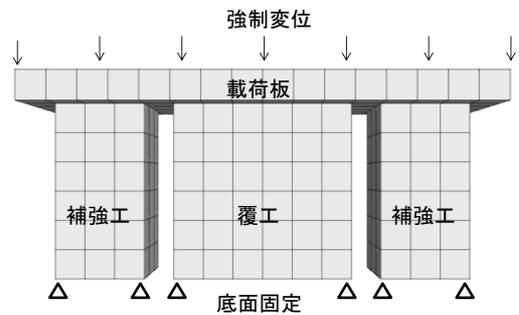


図-3 解析モデル

表-2 解析で用いた供試体の初期物性値

項目	値
ヤング係数	20 GPa
ポアソン比	0.2
粘着力	5 MPa
内部摩擦角	10 degree
ダイレーション角	0 degree
引張強度	0 MPa

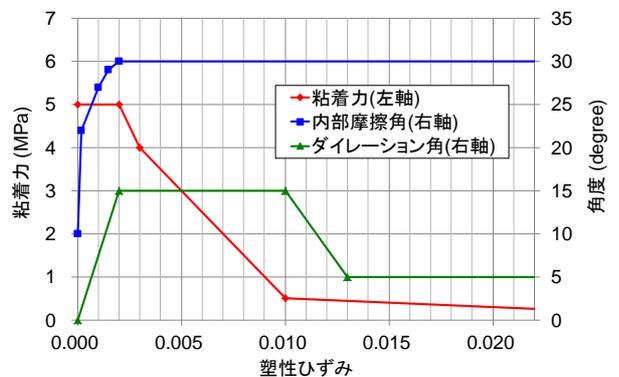


図-4 解析で用いたひずみ硬化/軟化特性

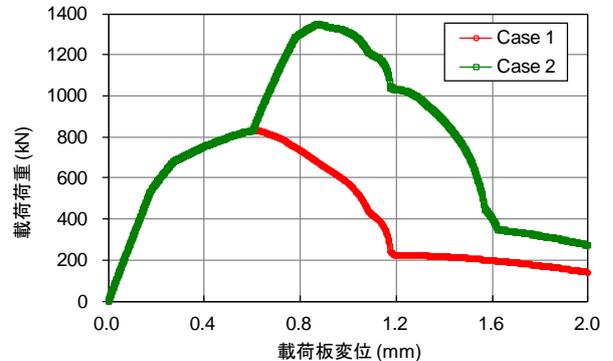


図-5 解析による載荷板の荷重-変位曲線